

The Getty Conservation Institute

recherche en conservation

CRATerre-EAG • ICCROM • GCI

P r o j e t T E R R A

Conservation des architectures de terre

Revue de la littérature scientifique des 15 dernières années

Rapport provisoire

**Hubert Guillaud
CRATerre-EAG**

2001 (2^{ème} version)

Sommaire

Introduction.....	p. 1
-------------------	------

Chapitre I : Connaissance et analyse du matériau terre..... p. 5

I.1. - Identification et caractérisation des matériaux de construction

en terre	p. 5
I.1.1. - Connaître le matériau	p. 5
I.1.2. - Identifier puis caractériser le matériau.....	p. 6
I.1.3. - Un savoir très élaboré.....	p. 6

I.2. - Révision des pratiques connues d'identification et de

Caractérisation	p. 7
I.2.1. - Quelles synthèses de l'état des savoirs ?	p. 7
- Quelles références, quels moyens ?	p. 7
- De l'utilité de rares tentatives de synthèse	p. 8
I.2.2. - Quelles procédures d'identification du matériau terre ?	p. 8
- Les analyses préliminaires de terrain	p. 8
- Analyses visuelles, tests et essais manuels.....	p. 8
- Mesures spécifiques d'humidité <i>in situ</i>	p. 12
- Mesures d'évaporation	p. 13
- Les analyses de propriétés en laboratoire.....	p. 14
- La granularité ou texture	p. 14
- La plasticité	p. 15
- Les matières organiques	p. 16
- Le retrait.....	p. 17
- Les carbonates et les sels solubles.....	p. 17
- La minéralogie	p. 19
- Mesures de porosité, porométrie, perméabilité et capillarité	p. 20
- Classification des sols.....	p. 21
I.2.3. - La caractérisation des matériaux.....	p. 22
- Les opérateurs démunis face au vide normatif.....	p. 22
- Quels essais de caractérisation ?	p. 23
- Révision des essais et tests dans la littérature.....	p. 24
- Essais de performance	p. 24
- Erosion du matériau aux intempéries.....	p. 24
- Test de capillarité	p. 25
- Caractérisation et performance des mortiers et enduits.....	p. 26
- Tests de contrôle de qualité	p. 27

I.3. - Brève conclusion..... p. 27

Chapitre II : Pathologie et diagnostic

des architectures de terre..... p. 29

II.1. – Liminaire

II.1.1. - Une phase fondamentale dans le processus de décision	p. 29
II.1.2. - Mise en situation du propos développé	p. 29

II.2. - L'importance de l'évaluation : quelle attitude adopter ?

Quelle philosophie ?	p. 31
----------------------------	-------

II.3. - Phénoménologie et principales causes des désordres	p. 36
II.3.1. - Introduction à une phénoménologie générale	p. 36
II.3.2. - De la connaissance des facteurs de durabilité	p. 36
II.3.3. - Du manque d'entretien et d'usage	p. 39
II.3.4. - Pathologies spécifiques de la bauge, de l'adobe et du pisé	p. 40
- Pathologie de la bauge	p. 40
- Pathologie de l'adobe	p. 42
- Pathologie du pisé	p. 44
II.4. - Diagnostiquer l'environnement du bâti.....	p. 46
II.5. - Micro pathologie, biodégradation, sels et efflorescences	p. 51
II.5.1. - Algues lichens et mousses.....	p. 52
II.5.2. - Sels solubles	p. 52
II.5.3. - Raisons physiques de la production d'efflorescences	p. 54
- Typologie des efflorescences	p. 54
II.6. - Le relevé des conditions ou de « l'état »	p. 55
II.7. - L'évolution du propos sur les méthodes de diagnostic.....	p. 62
II.7.1. - La recherche d'un positionnement spécifique	p. 62
II.7.2. - Une méthode qui fut inspiratrice, en France et au Maroc.....	p. 64
II.7.3. - Deux tentatives de mise au point d'une méthode de diagnostic plus spécifique aux architectures de terre	p. 73
II.7.4. - La méthode de diagnostic la plus récemment aboutie	p. 78
II.8. - La question spécifique des pathologies sismiques et de leur Diagnostic	p. 80
II.8.1. - Résistance des matériaux.....	p. 80
II.8.2. - Résistance des maçonneries en adobe, pisé et torchis	p. 83
II.8.3. - Réhabilitation sismique rétroactive	p. 85
II.8.4. - Une approche de caractère culturel.....	p. 92
II.9. - Le « monitoring » des désordres.....	p. 95
II.10 - Brève conclusion.....	p. 96
 Chapitre III – Interventions, traitements et évaluation.....	p. 99
III.1. – Liminaire	p. 99
Quelle philosophie, quelle attitude, quel regard sur l'objet et quel mode d'appréhension ?	p. 99
Les insuffisances de l'évaluation.....	p. 100
III.2. - Démarche appropriée, recommandations générales	p. 101
III.2.1. - Préserver la valeur en privilégiant l'emploi des matériaux, techniques et savoir-faire originaux.....	p. 101
III.2.2. - Quels centres d'intérêt et quels potentiels ?	p. 102
III.2.3. - Quelles stratégies de conservation pour l'architecture de terre ?	p. 105
III.2.4. - Bien faire plutôt que mal faire	p. 108
Actions bénéficiaires.....	p. 108
Actions à éviter	p. 110
III.3. - Le contrôle de l'environnement.....	p. 115



III.4. - L'entretien	p. 116
III.4.1. - Entretien courant, mise en état de risque minimum	p. 117
III.4.2. - Stratégies et plans d'entretien.....	p. 119
III.5. - Intervention minimale, réparations de base	p. 122
III.6. - Les abris et toitures de protection	p. 127
III.6.1. - Du provisoire au permanent.....	p. 127
III.6.2. - La typologie des solutions de protection et d'abri.....	p. 129
III.7. - Les couvertines ou « capping »	p. 134
III.7.1. - Les propriétés du procédé de « capping », des exemples et des avis	p. 134
Rôles et propriétés des « cappings »	p. 134
Enduits et « cappings » en terre stabilisée.....	p. 136
III.7.2. - Expérimentations innovantes	p. 137
Chapeau absorbant	p. 137
III.7.3. - En guise de synthèse sur la question des « cappings »	p. 138
III.8. – Le ré-entierement et autres procédés de stabilisation	p. 140
III.8.1. - Le ré-entierement ou « backfilling »	p. 140
III.8.2. - Quelques problèmes liés au « backfilling » partiel.....	p. 142
III.8.3. - L'efficacité du « backfilling »	p. 143
III.8.4. - Systèmes de drainages.....	p. 146
Drain périphérique	p. 146
Les géodrains horizontaux	p. 146
Les géodrains verticaux.....	p. 147
III.8.5. - Protections saisonnières du sommet et de la base Des murs	p. 148
- Couverture saisonnière du sommet des murs.....	p. 148
- Protection de la base des murs	p. 148
III.8.6. - Autres systèmes de protection.....	p. 149
- Protection aérienne par géotextiles tendus	p. 149
III.9. - Traitement de l'humidité capillaire et des dépôts salins.....	p. 150
III.9.1. - Les principales méthodes connues.....	p. 150
III.9.2. - Quelques solutions « antiques » repérées à Mari en Syrie.....	p. 151
III.9.3. - Plinthe perméable	p. 152
III.9.4. - Electro-osmose et électrophorèse	p. 153
- Electro-osmose.....	p. 153
- Electro-osmose phorèse.....	p. 154
III.9.5 - Drains atmosphériques	p. 154
III.9.6. - Nettoyage des sels.....	p. 155
III.10 - Interventions sur les structures, réparation des murs, rebouchage des fissures	p. 155
III.10.1. - Qualité des mortiers	p. 156
III.10.2. - Réparation des structures en bauge.....	p. 156
III.10.3. - Réparation des structures en pisé	p. 159
III.10.4. - Réintégration des maçonneries en adobe	p. 159
III.10.5. - Réparation des fissures	p. 160
III.11. - Réparation des dégâts sismiques	p. 164
III.11.1. - Chaînages, ancrages et autres interventions	p. 164
III.11.2. - Autres techniques de réhabilitation sismique	p. 166

III.12 - Conservation des enduits : pratiques traditionnelles et produits « naturels »	p. 167
III.12.1. - L'obligation de « respiration » des murs en terre	p. 168
III.12.2. - Enduits traditionnels	p. 169
III.12.3. - L'utilisation de produits « naturels »	p. 172
III.12.4. - Autres procédés repérés, récemment expérimentés	p. 176
- Réaction pouzzolannique	p. 176
- Hydrophobisation par injection électrocinétique	p. 177
III.13. - La conservation par l'emploi de produits chimiques	p. 177
III.13.1. - Le développement des recherches et expérimentations sur la consolidation chimique	p. 177
III.13.2. - Silicate de potassium	p. 178
III.13.3. - Emulsions acryliques, polymères et copolymères	p. 179
- Résine acrylique	p. 179
- Silanes et isocyanates	p. 181
- Isocyanate ou silane ?	p. 182
- Rhoplex E-330 et autres tests comparant divers produits	p. 184
- Quelques recommandations à propos du Rhoplex E-330	p. 189
III.13.4. - Polysilicates, éthyle silicate et produits similaires	p. 189
- Les polysilicates	p. 189
- L'éthyle silicate pour le traitement de surface et de sommets de murs	p. 190
- Ethyle silicate et traitement de l'humidité	p. 193
- Autres expériences comparées et discutées	p. 194
III.13.5. - Efficacité de la stabilisation chimique des enduits sur murs d'adobe ?	p. 196
III.13.6. - Un programme d'essais comparant l'efficacité des copolymères, des émulsions acryliques et bitumineuse, du jus d'agave et du mortier de terre-paille	p. 197
III.13.7. - Intervention « douce » ?	p. 201
III.13.8. - L'amélioration des pratiques traditionnelles : jusqu'où ?	p. 202
III.14 - Conservation des surfaces décorées sur structures en terre	p. 205
III.14.1. - Ré-attachement et « grouting »	p. 205
III.14.2. - Ré-attachement et réintégration	p. 208
III.14.3. - Ré-attachement, détachement et anastylose	p. 209
III.15 - Traitement de la biodégradation	p. 211
III.16 - Synthèse et conclusions	p. 212
III.16.1. - A propos des types d'interventions et de traitements	p. 212
III.16.2. - A propos de l'évaluation des interventions et Traitements	p. 215
BIBLIOGRAPHIE	p. 219

Introduction

Le champ d'investigation et d'application de la conservation des architectures de terre crue, dans sa pleine acceptation, est vaste. Il couvre un domaine d'intervention sur des objets d'une grande variété culturelle situés dans l'ensemble de la géographie planétaire. Il inclut des ressources de nature archéologique comme de nature architecturale historique, de valeur universelle commune au genre humain, comme de valeur plus modeste mais témoignant tout aussi bien de la mémoire des cultures constructives de l'homme depuis des temps très lointains et parvenues jusqu'à nous. Il couvre un large registre de techniques ayant valorisé l'emploi des sols pour construire les habitats, en milieu rural et urbain, comme les plus prestigieux édifices que l'homme a pu édifier au cours de son histoire. Architecture de torchis, de bauge, d'adobe ou de pisé, pour les techniques les plus répandues et déclinées en de nombreuses variantes, de l'échelle locale à régionale, internationale. Architectures de terre crue associant aussi d'autres matériaux de construction comme le bois, la brique cuite, la pierre, pour des raisons structurales ou décoratives, sans oublier l'éventail des matériaux de mortiers et enduits. Mais, c'est bien essentiellement de l'architecture en terre crue dont il sera question dans cet ouvrage. Le « devoir de mémoire » qui s'impose de fait devant la grande qualité de cette architecture, nous invite à conserver ce legs culturel d'exception pour garantir sa transmission aux générations futures. Car, comme l'a lumineusement écrit la philosophe française Simone Weil, dans « L'Enracinement », « Il serait vain de se détourner du passé pour ne penser qu'à l'avenir. (...) L'opposition entre l'avenir et le passé est absurde. L'avenir nous apporte rien, ne nous donne rien. C'est nous qui, pour le construire, devons tout lui donner, (...). Mais pour lui donner il faut posséder et nous ne possédons d'autre vie, d'autre sève que les trésors hérités du passé et digérés, assimilés, recréés par nous. De tous les besoins de l'âme humaine, il n'y en a pas de plus vital que le passé. ». Mais, si les pratiques conservatoires des architectures de terre ont été de tout temps pleinement intégrées dans la quotidienneté de la vie humaine, qui a toujours pris soin de son patrimoine architectural, comme le montrent souvent les recherches archéologiques par les témoignages de réparations, de restaurations ou de reconstructions, les pratiques mobilisées pour ce faire ne constituent pas pour autant une « discipline » ou une « science » spécifiques. En effet, le domaine de la conservation des architectures de terre crue commence à peine à établir sa spécificité et à se distinguer de la conservation des architectures en bois, briques cuites ou en pierres. Pour autant, ces autres domaines distincts de pratiques conservatoires ont considérablement apporté à la conservation des architectures de terre crue. Aux plans de la réflexion scientifique, de la définition de méthodes d'intervention, des types de traitements et des procédures de contrôle et d'évaluation. Par ailleurs, la recherche et les projets développés depuis ces 30 dernières années, en matière de conservation des architectures de terre crue, ont considérablement progressé. Les échanges d'expériences, la communication des résultats des recherches, ont notamment bénéficié des plate-formes et tribunes offertes par des conférences spécialisées, organisées au niveau international (Yazd, Iran, 1972 et 1976, Bruxelles, Belgique, 1984, Beijing, Chine, 1985, Rome, Italie, 1987, Las Cruces, USA, 1990, Silves, Portugal, 1993), ou par différents pays (Santa Fe, USA, 1977), en Europe et en Amérique latine, au cours des années 80, pour ne citer que les événements les plus marquants. Mais, au delà de ces apports féconds, il est tout à fait clair, et sans doute paradoxalement au regard de l'histoire millénariste des architectures de terre traduisant l'évidence de savoirs et de savoir-faire transmis de génération en génération de bâtisseurs, et bien au delà des enseignements du génie des lieux et des cultures, que la « science » de la conservation des architectures de terre crue, est à peine

naissante et qu'elle doit encore être structurée. Ainsi, faire le point sur la production scientifique de ces dernières années s'imposait comme un préalable indispensable pour contribuer à aller plus avant dans cette direction.

Cette revue de la littérature sur la conservation des architectures de terre couvre les 15 dernières années de la production scientifique de nombreux chercheurs et rend aussi compte des expériences de nombreux opérateurs ayant contribué au développement de projets de conservation de sites archéologiques et d'édifices historiques, sur une large géographie mondiale. Pour réaliser ce travail, sur un temps limité effectif de deux mois, nous avons principalement exploité le fonds du centre de documentation du CRATerre-EAG, comptant plus de 7 000 références dans lesquelles une première sélection de 757 titres de thèses et mémoires, rapports de recherche, communications et articles scientifiques, rapports de projets et études de cas, se rapportant plus directement au domaine couvert, a été opérée. A ces références ont été ajoutées d'autres sources d'information issues du BCIN et du « Project Terra Research Survey » (1998), qui ont porté notre pré-sélection à 1 269 documents. Un second tri a été ensuite opéré qui a finalement retenu 621 sources documentaires. Notre sélection aura aussi été limitée par notre connaissance et pratique des langues vivantes portant principalement sur un fonds français, anglais, espagnol et italien. Dans les limites du temps et des moyens accordés à ce travail, il a été volontairement décidé de réviser la littérature couvrant quatre thèmes principaux. Il s'agit de, i), « connaissance et analyse du matériau terre » ; ii), « pathologie et diagnostic des architectures de terre » ; iii), « interventions et traitements » et, iv), « évaluation des interventions ». Chacun de ces thèmes a été subdivisé en différents sujets. Chaque référence documentaire pré-sélectionnée, a été répartie dans ces quatre entrées thématiques et suivant les sujets retenus, obligeant à référencer plusieurs fois les mêmes sources selon la teneur des propos exploitables à plusieurs niveaux. Il aura donc été nécessaire de revenir sur les mêmes sources en révisant successivement les quatre thèmes et leurs sujets. Pour ventiler l'ensemble des sources et opérer une première lecture générale, plusieurs critères ont été retenus dont celui de l'identification et de la typologie documentaire, de la typologie de la recherche (fondamentale, appliquée), d'une évaluation quantitative et statistique vis à vis des thèmes et des sujets, du développement de la recherche (problématisation, hypothèses, objectifs, méthode et résultats), et enfin, d'évaluation qualitative, principalement pour éviter les redondances et pour apprécier la valeur des apports, en distinguant ce qui apparaît comme essentiel et novateur de ce qui peut être considéré comme plus classique. En effet, l'ensemble de la littérature révisée révèle une duplication des propos ou une restitution dans une large gamme typologique de supports de communications. Au delà de cette première phase du travail, nous nous sommes attachés à réaliser ensuite des fiches de lecture, qui constituent finalement le corpus documentaire de référence de cette révision littéraire, couvrant 132 titres et 118 auteurs dont certains seront successivement référencés dans le texte final.

Tout en s'appuyant sur l'expérience que notre équipe de recherche a développé depuis ces quinze dernières années dans le domaine de la conservation des architectures de terre, ce travail reste une contribution modeste face à l'ampleur et la richesse, comme la qualité des sources qui ont été exploitées. Il valorise surtout les apports des chercheurs et des opérateurs du milieu de la conservation des architectures de terre ainsi que d'autres contributions qui nous ont semblé importantes à intégrer, notamment au delà du seul propos scientifique et/ou technique spécialisé, c'est à dire en matière de philosophie ou de méthodologie. Car il demeure indispensable de garder un recul, de prendre

une altitude sur le point de vue technique, stricto sensu. Notre propos a surtout visé à établir une synthèse, qui, au delà d'une compilation nécessaire, est aussi fondée sur une discussion et parfois une lecture critique. Il nous est parfois apparu utile de rendre compte très directement des propos des auteurs mais sans avoir trop abusé de la forme du résumé. Nous n'aurons été qu'un interprète de tous ces auteurs qui se reconnaîtront. Connaissant plusieurs d'entre eux, nous les remercions très sincèrement et cordialement. Que tous sachent que nous avons pris grand plaisir à les lire et à réaliser ce travail qui nous aura aussi considérablement appris.

Sur la mise en forme de ce document encore provisoire, nous avons souhaité clairement distinguer le propos des auteurs que nous avons révisé, ou les synthèses que nous en avons faits, du propos critique du « réviseur » parfois assorti d'informations complémentaires ou de commentaires plus personnels. Ainsi le propos des auteurs est restitué dans le texte en police de caractère standard alors que le propos du réviseur est restitué en italique. Par ailleurs, on remarquera que les noms des auteurs révisés, lorsqu'ils apparaissent pour la première fois dans le texte et pour chacune de leurs contributions datées, sont présentés en caractères gras.

Nous devons particulièrement remercier tous ceux qui ont contribué au déroulement de ce travail : Hugo Houben et Titane Galer-Houben, qui ont assuré la présélection documentaire, à Villefontaine ; Charles Boyer de Bouillane qui a opéré le classement thématique et par sujets de l'ensemble des sources retenues en se référant à la méthode de travail que l'on a préalablement définie ; Patrice Doat et l'ensemble des chercheurs du laboratoire CRATerre-EAG qui ont apporté leur appui et qui ont soutenu l'investissement intellectuel nécessaire. Nous voulons aussi remercier personnellement Erica Avrami et William S. Ginell, du Getty Conservation Institute, qui nous ont confié ce travail.

Cette révision de la littérature ne constitue qu'une étape de synthèse des connaissances dans le domaine couvert. Elle n'aura pas abordé l'intégralité des thèmes qui constituent l'ensemble du champ de recherche et d'application et gagnerait à être complétée. Nous espérons que ce travail puisse contribuer à mieux fonder les bases des investigations futures et aussi à fournir, en partie, des données utiles aux pratiques conservatoires des architectures de terre, dans les faits des projets menés sur des terrains divers dans le monde.

Hubert GUILLAUD
Maître-assistant 1^{ère} Classe chercheur
et co-directeur scientifique du
CRATerre-EAG, Grenoble, France

1^{ère} version originale en mai 1999

2^{ème} version révisée en mars 2001

I - CONNAISSANCE ET ANALYSE DU MATERIAU TERRE

I.1. - Identification et caractérisation des matériaux de construction en terre

I.1.1. - Connaître le matériau

La conservation du patrimoine architectural, quels que soient les matériaux de construction qui ont été mis en œuvre par les bâtisseurs, et quelle que soit la valeur historique de ce patrimoine, met les opérateurs devant l'exigence de connaissance des matériaux. Dans le domaine de l'architecture en terre, cette connaissance est indispensable à plusieurs étapes de la démarche de conservation. Dans un premier temps, durant la phase nécessaire et incontournable de la documentation de l'objet architectural. Il s'agit alors « d'identifier », puis plus avant de « caractériser » le ou les matériaux de construction en terre. Cela, afin de définir, le plus clairement possible, c'est à dire, scientifiquement, la nature, la constitution et la conformation du ou des matériaux, ainsi que leurs caractéristiques pour différents aspects « qualitatifs ». Mais, au-delà de cette définition des propriétés « physiques » du matériau, l'identification et la caractérisation devront aussi être en mesure de fournir des indices sur d'autres éléments de connaissance fondamentaux. Par exemple sur l'histoire du matériau, en établissant les repères de datation. Ou encore sur la relation qui existe entre le matériau observé, étudié, analysé, avec l'environnement naturel du site archéologique ou des bâtiments historiques. Une relation qui renvoie les opérateurs à la nécessaire connaissance des sols où le matériau de construction a été prélevé, soit dans un environnement immédiat, soit plus vaste. En effet, dans un deuxième temps, lorsque la phase de documentation des matériaux de l'architecture aura été réalisée, se posera la question de l'intervention, de ses modes et pratiques, pour engager le processus conservatoire concret de telle ou telle partie de la structure construite, de tel ou tel élément ou système constructif. A cette étape, la connaissance du matériau, identifié et caractérisé, la prospection d'un gisement ou d'une carrière de terre dans l'environnement, dans une démarche guidée par le souci de produire et de mettre en œuvre des matériaux de construction répondant au mieux aux critères d'authenticité et/ou d'intégrité, s'imposeront comme un outil d'intervention essentiel. Mais, en deçà du déroulement méthodologique « orthodoxe » du processus de conservation structurale de l'architecture, c'est à dire en plaçant l'étape d'intervention au delà de la documentation la plus achevée possible de l'objet architectural, l'opérateur peut être très vite confronté à la décision d'une intervention préventive « urgente » visant à stopper l'évidence d'une dégradation active, ou pour le moins à la ralentir. Ce sont par exemple des réparations de base, ou des consolidations partielles du « construit », provisoires et réversibles. L'identification et la caractérisation du matériau de construction de l'objet architectural apparaissent alors comme une étape de connaissance fondamentale et finalement comme un préalable indispensable pour fonder scientifiquement la méthode du processus conservatoire, et la pertinence comme la justesse de l'action conservatrice.

I.1.2. - Identifier puis caractériser le matériau

La plupart des approches et des méthodes scientifiques visant à établir la connaissance des matériaux de construction se suffisent à regrouper l'ensemble des procédures, observations, analyses, tests et essais, sous l'unique vocable de « caractérisation ». Mais, le savoir, comme le savoir-faire, démontrent que si la finalité de la connaissance du matériau est bien de le « caractériser », les procédures qui jalonnent l'élaboration et l'expression du savoir passent par plusieurs étapes successives et distinctes décrivant une séquence méthodique. Pour le matériau terre, en partant du sol - ou de la carrière - pour rejoindre le pied du mur - on pourrait dire aussi « de la terre à la brique » - , la séquence passe en première étape par une phase bien spécifique « d'identification » qui concerne précisément la connaissance scientifique du sol ou du matériau brut. Il s'agira notamment, sur le terrain, d'observer le matériau pour le décrire, en passant par un éventail d'analyses préliminaires, puis par divers essais, et de compléter cette première approche descriptive par des analyses et des essais menés en laboratoire. En se référant alors, au terme de cette première phase de la séquence d'observation et d'analyse d'identification, à des abaques et des classifications, on sera en mesure de garantir une description scientifique du sol ou du matériau brut. Cette étape de connaissance est indispensable avant de passer à l'étape suivante - qui inaugure le processus de fabrication ou de production du matériau de construction - , à une phase tout aussi indispensable, de « caractérisation », c'est à dire de définition des « caractéristiques » et des propriétés du matériau pour différents niveaux de connaissance qualitative. Cette deuxième étape permettra en effet de réaliser une série d'essais visant à mieux connaître la terre que l'on va soit bâtir directement (torchis, bauge ou pisé, par exemple), soit mettre en œuvre sous forme de maçonnerie à l'aide d'un mortier (brique d'adobe). Ce sont alors des essais passant par des phases successives de mise au point et de performances visant à réduire les marges d'erreur qualitatives, des essais complémentaires de caractérisation s'ils s'avéraient nécessaires, des essais de contrôle et enfin des essais d'acceptation. Ces procédures de « caractérisation » sont réalisées simultanément sur le terrain, c'est à dire sur l'aire de production, et en laboratoire.

I.1.3. - Un savoir très élaboré

Cette démarche que l'on vient d'énoncer, qui distingue l'étape d'identification de celle de la caractérisation, distingue aussi le matériau terre des autres matériaux de construction traditionnels les plus couramment employés, la pierre et le bois, par exemple, dont le processus de transformation, par l'homme, depuis le matériau brut jusqu'au matériau à bâtir (l'adobe par exemple) - ou même construit (le torchis, la bauge ou le pisé) - apparaît finalement comme plus élaboré qu'on pourrait le penser. Car finalement, sans être trop réducteur, le bois ou la pierre mis en œuvre, ne sont-ils pas - bien que judicieusement choisis par les constructeurs sur la base d'une connaissance de leurs qualités constructives - des matériaux simplement « coupés » ou « taillés », puis assemblés. La maîtrise de la construction en terre n'exige-t-elle pas bien davantage lorsqu'il s'agit de composer avec deux sols différents qu'il faudra mélanger, d'amender un sol avec un autre matériau végétal ou minéral, lorsqu'il s'agit de définir la bonne teneur en eau, de stabiliser la terre avec tel ou tel liant hydraulique ou produits de synthèse chimique, ou quand il faut pétrir le mélange que l'on a préparé, puis le façonner directement en paroi de torchis ou en couches de bauge, ou de le mouler en blocs d'adobe, ou encore de le compacter de main d'homme et ainsi construire le mur en forme, directement

(pisé) ? Que l'on ne voit pas dans ce propos une tentative de hiérarchisation de la valeur de telle ou telle culture constructive dans l'éventail connu, mais l'expression d'une relative complexité des savoirs et savoir-faire de la construction en terre. Ceux-ci résultent d'une très longue histoire fondant son origine dans l'aube de l'habitation de l'homme et nous sont parvenus par le chenal de la transmission orale et gestuelle en traversant les millénaires. Cela remet en valeur toute la dimension de l'empirisme et de l'expérience qui mériterait sans aucun doute d'être confrontée à l'expression écrite des savoirs et des savoir-faire fondant le corpus d'une théorisation et d'une démarche d'élaboration scientifique de la connaissance. Toutefois, l'objet de notre recherche se limitera ici à une révision de la littérature technique et scientifique récente couvrant les quinze dernières années de la production des savoirs et, partiellement, de l'expression des savoir-faire.

I.2. - Révision des pratiques connues d'identification et de caractérisation.

I.2.1. - Quelles synthèses de l'état des savoirs ?

• Quelles références, quels moyens ?

La littérature scientifique et technique récente dont nous disposons, couvrant les questions de l'identification des terres et de la caractérisation des matériaux de construction en terre, qui est accessible aux opérateurs de la conservation du patrimoine architectural en terre, est assez abondante. Cette littérature technique et scientifique est produite au carrefour de plusieurs disciplines parmi lesquelles on relève l'agronomie, la pédologie, la géotechnique, la minéralogie, la chimie. Confronté à cet éventail disciplinaire et à l'abondance de la production écrite des scientifiques et des techniciens, on ne peut qu'opposer en préalable les questions de la quantité et de la qualité de cette production. Car, au delà d'un repérage de ce qui constituerait un corpus de référence permettant d'isoler des sources « clé » indispensables, force est-on de constater une grande duplication de la production littéraire et donc de très nombreuses redondances. De plus, il faut ici relever que la littérature accessible est davantage issue des domaines de la géotechnique, de l'ingénierie ou de la construction et assez rarement du domaine spécifique de la conservation du patrimoine architectural en terre, discipline somme toute récente et toujours en cours de structuration. La question centrale soulevée par les chercheurs et les opérateurs est celle de l'absence de standards spécifiques pour la conservation architecturale du bâti en terre. Cette lacune renvoie les opérateurs à l'obligation d'adapter, ou de modifier, les standards de référence dont ils disposent, issus de l'étude d'autres matériaux, tels que les matériaux dits « poreux », ou bien les mortiers traditionnels. Enfin, si les opérateurs commencent à s'accorder sur le caractère indispensable de telle ou telle analyse, de tel ou tel test ou essai à réaliser pour garantir un bon degré de connaissance du matériau, ils existe encore une large latitude dans le choix des méthodes et des procédures, et également dans le choix des techniques et des équipements utilisés. Mais, pour revenir au niveau d'un « principe de réalité », ce sont finalement le plus souvent les moyens dont disposent les opérateurs (accès ou non à un laboratoire, degré d'équipement de ce laboratoire, distance des sites, p.e.), qui font la différence et qui imposent les procédures et modes d'analyse, de test et d'essai. On fait avec ce dont on dispose, physiquement, matériellement et financièrement.

• De l'utilité de rares tentatives de synthèse

Depuis ces quinze dernières années, si de nombreuses publications rendant compte de recherches ou d'expérimentations se sont attachées à développer ou exposer des approches fragmentaires ou sectorielles, ou encore très spécifiques de la question de l'identification et de la caractérisation, peu de publications ont tenté une approche la plus complète possible, donnant à lire une synthèse, et donc à établir et proposer un « état actualisé » des savoirs et des savoir-faire. Il faut ici relever le « *Earth Construction Primer* » de **H. Houben et H. Guillaud** (1984), précédant une édition française (1989), puis une deuxième édition anglaise révisée (1994). *Tout en s'appuyant sur des sources scientifiques antérieures d'autres auteurs, successivement publiées au delà de la Seconde Guerre Mondiale et principalement au cours des années cinquante à soixante et dix, mais également en développant et approfondissant un exposé publié dans un ouvrage précédent (« Construire en terre », P. Doat et al., 1979), l'ouvrage de H. Houben et H. Guillaud offre à lire un propos plus complet sur les procédures et les modes opératoires des observations, analyses, tests et essais de terrain, comme de laboratoire. Il complète le propos opératoire et « méthodique » par des points de vue critiques, par la mise en évidence de paramètres qui influent sur les procédures d'identification et de caractérisation - et donc sur les résultats - auxquels s'ajoutent des interprétations présentant un intérêt autant scientifique que didactique. Il fournit une lecture comparée des principales classifications géotechniques (P & CH et USCS) identifiant la typologie des sols. Il précise les critères de convenance des terres pour la construction en terre, en général et pour tel ou tel mode d'utilisation croisant le type de texture des sols et leur état hydrique, ou encore pour des matériaux de construction spécifiques (adobe, pisé, par exemple). Il étend ce propos sur la convenance des terres à leur stabilisation, soit par ajout de liants hydrauliques courant (ciment, chaux), soit par ajout de bitume, soit par amendement en fibres végétales et éléments minéraux. Enfin, il tente une classification des caractéristiques des principaux matériaux de construction en terre, soit de leurs caractéristiques mécaniques, statiques, hydriques, physiques et thermophysiques, tout en faisant le point sur la question de la normalisation. Bien que le propos de cet ouvrage soit centré sur la « construction en terre » et qu'il soit conçu comme un guide technique pour les constructeurs contemporains engagés dans un processus de « réactualisation » des architectures de terre, il est aussi un outil de référence pour de nombreux opérateurs de la conservation du patrimoine architectural en terre qui l'utilisent et le citent très souvent dans leurs bibliographies.*

1.2.2. - Quelles procédures d'identification du matériau terre ?

• Les analyses préliminaires de terrain

- Analyses visuelles, tests et essais manuels

Si la littérature scientifique et technique couvrant le domaine de la construction en terre fait assez systématiquement référence à la possibilité - et la nécessité - de réaliser des analyses préliminaires de terrain, la littérature scientifique couvrant le domaine de la conservation architecturale le rappelle très rarement et valorise davantage les analyses de laboratoire. Ces analyses préliminaires réalisées sur le terrain, principalement sous forme d'observations macroscopiques et de tests ou essais manuels simples et rapides, utilisent un

matériel accessible et peu coûteux. Elles permettent d'apprécier et de prédéterminer certaines propriétés et caractéristiques du matériau. Ce sont pour l'essentiel des analyses conduites avec des procédures de test et essais de nature empirique exigeant beaucoup de rigueur, dont les résultats devront être confirmés - ou infirmés - par des analyses scientifiques de laboratoire.

H. Houben et H. Guillaud (op.cit.), ont présenté l'éventail complet des ces analyses de terrain, avec leurs procédures, ainsi que les grandes lignes d'interprétation des observations. Pour cet éventail d'analyses préliminaires, rappelons brièvement les types d'observations, de tests et d'essais proposés par les auteurs :

- l'examen visuel de la texture grossière d'une terre sèche, sur la fraction fine débarrassée de ses plus gros éléments, cailloux, graviers et gros sables ;
- l'essai de l'odeur qui peut rendre compte de la nature organique du matériau ;
- l'essai de morsure qui permet d'apprécier la fraction granulaire dominante en sables, en silts ou en argiles ;
- l'essai du toucher à l'effrèment entre les doigts et la paume de la main qui permet aussi d'apprécier la fraction granulaire dominante ;
- l'essai de lavage avec, selon la facilité de rinçage de la terre sur les mains, une indication fournie sur la dominante granulaire ;
- l'essai de l'éclat qui renseigne sur la nature des fines dominantes, silts ou argiles ;
- l'essai d'adhérence à la spatule ou à un couteau qui permet d'apprécier l'importance de la fraction argileuse ;
- l'essai de sédimentation simplifiée dans un flacon cylindrique à fond plat, qui permet, par agitation et décantation d'un mélange de terre et d'eau, d'évaluer la quantité des différentes fractions de grains déposées ;
- le test de retrait linéaire qui donne des indications sur la quantité des argiles et une première idée de leur activité ;
- le test de résistance à sec d'une pastille de terre sèche qui est ensuite cassée et pulvérisée à la main pour apprécier, selon le degré de résistance, la teneur et le degré de pureté des argiles, ou leur nature silteuse ou sableuse ;
- le test de ressuage d'une boule de mortier fin qui, selon l'aspect et la réaction permet aussi d'interpréter la teneur en éléments fins, sables fins, silts, argile silteuse ou argile ;
- le test de consistance sur une boule de mortier fin roulée en cordon mince qui doit se fractionner à son $\varnothing = 3$ mm et qui, une fois reconstitué en boule écrasée entre le pouce et l'index, permet, selon la facilité à reconstituer cette boule, d'interpréter la quantité de la fraction argileuse ou sablo-silteuse.
- le test de cohésion qui consiste à confectionner un rouleau de terre sous forme de cigare de $\varnothing = 12$ mm et à interpréter la teneur en argile, selon la longueur obtenue avant que le cigare, placée sur la paume de la main et poussé avec précaution, ne se casse. Ce test est aussi connu sous l'appellation de test du ruban lorsque l'on aplatit le cigare entre le pouce et l'index et que l'on mesure alors la longueur du ruban façonné avant qu'il ne se casse.

Dans notre revue de la littérature, nous n'avons que très rarement repéré une référence à ces analyses préliminaires de terrain dont les procédures sont bien connues et établies. R.E. Hughes (1988), les mentionne en précisant que tous les tests géotechniques standard visant à caractériser les sols sont applicables pour mieux connaître les sols utilisés en construction. L'auteur évoque l'examen visuel de texture, l'examen de morsure, le retrait linéaire, un test dit « d'affaissement » à l'état humide, d'agitation à l'état semi-liquide, le test du ruban, la pénétration d'eau (ressuage), le brossage métallique et l'écrasement de cubes test de sol, sous simple poids. Il s'agit là pourtant d'une simple évocation générale puisque l'auteur, valorisant par la suite son expérience de

terrain, conseille finalement d'entreprendre d'autres analyses de caractérisation en laboratoire sur lesquelles nous reviendrons par la suite.

L'éventail de 13 tests et essais de terrain que nous avons précédemment évoqué peut être complété par d'autres observations et tests qui permettent d'apprécier d'autres propriétés du matériau. Il faut ici relever toute l'importance des observations de l'environnement, de nature géologique et pédologique, qui permettent de préparer les analyses minéralogiques par l'étude des sols hérités du processus d'altération et d'évolution des roches. Ces observations renvoient à la lecture des cartes et des notices d'accompagnement qui sont en mesure d'apporter des précisions essentielles sur les profils de sols en présence, et sur la nature et composition de leurs principaux horizons. Relevons également l'examen de la couleur des sols qui renvoie également à des classifications. Plusieurs auteurs nord-américains, en effet, donnent une grande importance à cet examen et font référence à la « procédure visuelle-manuelle de description et d'identification des sols », selon la charte de Munsell et en application de la norme ASTM D1535-80. Cet examen permet d'apprécier les grands traits de la minéralogie. Nous avons relevé l'évocation de cet examen de la couleur chez L. Dassler (1990), C.S. Silver (1990), R. Hartzel (1996), et P.S. Jerome qui fournit une présentation très claire et complète de cet examen de la couleur dans sa thèse d'architecture présentée à Columbia (1991) traitant de l'analyse et de la conservation des constructions en adobe de l'Age du Bronze en Crète. P.S. Jerome suggère néanmoins que cet examen de la couleur, sous lumière naturelle, soit complété par un examen sous lumière réfléchie au microscope stéréoscopique, couplé à une source lumineuse de fibre optique, diodique. Cet examen complémentaire permettra alors de mieux préciser les variations de couleur, et donc d'affiner l'identification minéralogique, tout en renseignant également sur la porosité du matériau. Un autre test de terrain est aussi souvent évoqué, la mesure de pH. Ce test permet de préciser le niveau d'acidité du matériau, son caractère basique ou neutre, à l'aide d'un équipement léger (papier pH, instrument de poche du type « *pHep* » ou encore « *Hatch kit* »), comme le suggèrent plusieurs auteurs : L. Dassler (1990), C.S. Silver (1990), R. Hartzel (1996), Houben (1997).

Mais, au-delà de cette simple évocation des analyses d'identification préliminaires de terrain, ce qui nous semble devoir être relevé, c'est la corrélation qu'il convient d'établir entre ces analyses et les propriétés du matériau terre, ainsi que la correspondance entre les analyses « empiriques » de terrain et les analyses « scientifiques » de laboratoire. On doit alors préciser que cet aspect de la question n'est pratiquement pas évoqué ou de façon très fragmentaire et réductrice par la littérature que nous avons révisée. Cet état de fait peut traduire un désintérêt de la communauté scientifique pour ces analyses préliminaires mais aussi une méconnaissance de l'intérêt qu'elles représentent, notamment pour orienter et justifier le choix des analyses en laboratoire, pour mieux contrôler la dépendance des opérateurs à leur égard et donc réduire les coûts d'analyse, facteur important à prendre en compte selon les contextes d'opération.

Les corrélations entre les propriétés du matériau et les analyses de terrain et de laboratoire méritent donc d'être rappelées et précisées. On peut ainsi relever un ensemble de sept propriétés fondamentales qui permettent d'identifier le matériau terre.

- **La granularité**, parfois autrement nommée texture, qui est définie par les différentes fractions de grains (nature et quantité) composant la terre. Ces fractions granulaires en partant des plus fines aux plus grosses sont les suivantes : argiles, silts, sables fins, gros sables, graviers et cailloux. Sur le

terrain, les analyses préliminaires permettant d'identifier la propriété de granularité sont : l'examen visuel de la texture grossière, l'essai de morsure, l'essai du toucher à l'effritement, l'essai de lavage des mains et l'essai de sédimentation simplifiée. En laboratoire, l'analyse correspondante est la granulométrie qui comprend une sédimentométrie pour l'identification des fractions fines de $\varnothing < 0,08$ mm. La littérature référence assez systématiquement cette analyse de granulométrie, selon différentes procédures sur lesquelles nous reviendrons.

- **La plasticité**, qui permet d'étudier la sensibilité de la terre en présence d'eau. Cette propriété est plus difficile à évaluer par des essais de terrain. Il est néanmoins possible de l'apprécier par le test de consistance sur une boule de mortier fin et par l'essai du cigare ou du ruban. En laboratoire, ce sont principalement les analyses au bleu de méthylène et surtout les limites d'Atterberg (limites de liquidité ou LI, de plasticité ou Lp, de retrait ou Lr, et l'Indice de Plasticité ou Ip), qui permettent d'identifier la propriété de plasticité. Les limites d'Atterberg sont très systématiquement référencées par la littérature.

- **La cohésion**, qui précise la capacité des grains à être liés entre eux et la résistance à la traction de la fraction de mortier grossier, soit de $\varnothing < 2$ mm. Sur le terrain, la cohésion peut être relativement bien appréciée par le test de résistance à sec de la pastille, et par l'essai du cigare ou du ruban. En laboratoire c'est principalement l'essai à la traction humide, ou essai du « 8 », mis au point par l'allemand Niemeyer, en 1944, puis intégré aux normes Din allemandes en 1956, qui permet de tester la propriété de cohésion. Bien que répertorié par la littérature, cet essai reste toutefois peu pratiqué. H. Houben et H. Guillaud (1984, 1989 et 1994), le mentionnent.

- **La compactibilité**, ou propriété de la terre à pouvoir être compactée jusqu'à obtenir sa densité sèche maximale, à une teneur en eau dite « optimale » ou T.E.O. Cette propriété renseigne également sur la porosité et la perméabilité de la terre. Les tests de terrain permettant d'évaluer la compactibilité sont très empiriques et consistent principalement à compacter le sol ou à compacter de la terre dans des moules pour former des blocs. L'utilisation d'un pénétromètre de poche permet alors de se faire une idée de cette propriété en donnant une valeur approchée de la densité de la terre. En laboratoire, la propriété de compactibilité se mesure principalement avec l'essai Proctor, standard ou modifié, essai géotechnique référencé par l'AASHTO. Mais, la littérature que nous avons révisée semble ne donner que peu d'importance à l'analyse de cette propriété.

- **Le retrait**, ou propriété de la terre à changer de volume en présence d'eau. Sur le terrain, c'est principalement le moulage de pastilles de mortier fin ($\varnothing < 0,4$ mm) qui permet de se faire une idée du retrait en évaluant la réduction du diamètre de la pastille par rapport à celui du moule. En laboratoire, le test de retrait linéaire conçu par Alcock, assez bien référencé dans la littérature, permet une bonne appréciation de cette propriété. Rares sont les auteurs qui référencent l'intérêt d'étudier cette propriété pourtant fondamentale.

- **L'activité chimique** d'une terre peut être très globalement appréciée sur le terrain par l'essai de l'odeur qui renseigne essentiellement sur la présence de composants organiques. Mais c'est davantage avec la mesure de pH que l'on a déjà évoquée que cette activité pourra être mieux évaluée. Plusieurs auteurs relèvent l'importance qu'il convient d'accorder à cette mesure du pH. En laboratoire, la réalisation de tests chimiques à l'aide de produits réactifs étalonnés, permettra d'identifier les composants chimiques de la terre et particulièrement les sels. Nous reviendrons plus en détail sur cette analyse des sels unanimement évoquée comme essentielle par la littérature.

- **les propriétés minéralogiques** sont difficiles à apprécier sur le terrain car il s'agit pour l'essentiel d'observer l'environnement naturel et les profils des sols (talus, tranchées, trous). Cela exige néanmoins un niveau de formation et de

compétence adapté en géologie et en pédologie. La littérature fait également mention du test d'Emerson (Houben et Guillaud, *ibid*) mais qui est, semble-t-il, peu pratiqué. Des renseignements préliminaires essentiels sont également donnés sur la minéralogie par l'observation de la couleur en utilisant la procédure de la charte de Munsell, comme le relèvent beaucoup d'auteurs nord-américains. Mais ce sont surtout les analyses de laboratoire qui permettent d'identifier scientifiquement les propriétés minéralogiques de la terre. L'analyse diffractométrique aux rayons X (XRD), ou l'analyse thermique différentielle (ATD), sont parmi les procédures les plus souvent référencées par la littérature scientifique. Nous y reviendrons par la suite.

- Mesures spécifiques d'humidité in situ

Très peu d'éléments sont fournis par la littérature sur la question des mesures d'humidité. Nous avons relevé l'intérêt d'une recherche doctorale menée par M. **Bendakir** (1993), sur la préservation du site syrien de Mari. Dans le cadre d'une étude des phénomènes d'humidité constatés sur le site, l'auteur évoque des mesures d'humidité *in situ* effectuées à l'aide d'un appareil de poche, un « Humitest ». L'appareil permet de mesurer la variation du taux d'humidité des murs, en surface et en profondeur. Il s'agit d'un appareil électrique qui utilise la variation de la résistance électrique que l'on mesure entre deux électrodes placées au contact du matériau, ou plus ou moins enfoncées en profondeur. Mais, M. Bendakir relève que l'utilisation de cet appareil n'est pas aisée et que plusieurs facteurs tendent à rendre les mesures imprécises. D'abord le fait que l'appareil a été conçu pour d'autres matériaux que la terre et que son utilisation pose donc des problèmes d'adaptation. Ainsi, pour les mesures en profondeur, une sonde a été mise au point qui facilite la détermination de la profondeur (en cm) de la mesure correspondant à la valeur maximale affichée sur l'appareil (90 %). Ensuite, l'influence des sels sur la conductivité électrique des matériaux. L'auteur relève finalement que ce détecteur d'humidité électrique ne donne pas des valeurs absolues du taux exact d'humidité des murs mais qu'il permet néanmoins de déceler des variations d'humidité même faibles, et qu'il offre des possibilités d'effectuer des mesures sur les mêmes points à des moments différents. Ces mesures sont complétées par des prélèvements d'échantillons par carottage, lesquels sont pesés à l'état humide, puis séchés à l'étuve à une t° située entre 100° et 120° C, de façon à obtenir une mesure de poids sec qui n'est pas perturbée par la déshydratation des sels présents en abondance dans la terre (à une t° d'étuvage plus élevée). Ainsi, les teneurs en eau sont donc surévaluées d'environ 2 %, valeur confirmée après avoir effectué des pesées comparées de matériau séché à basse t° (60° C.) et à plus haute t° (140° C.).

On aura aussi relevé l'évocation de mesures de variation des températures et de l'humidité relative diurne, chez **S. Skibinski** (1991). Ces mesures sont réalisées pour évaluer l'hypothèse du rôle de ces variations sur le processus de dégradation des murs en adobe. Les températures sont prises avec un thermomètre de mercure gradué à échelle de $0,2^{\circ}$ C et l'humidité mesurée à l'aide d'un hygromètre. Ces mesures montrent que l'humidité relative (%) varie très sensiblement (de 23 à 100%) avec les variations de t° (entre un optima de 42° C et un minima de 13° C.). D'autres mesures de t° de surface de la paroi et en profondeur (2,5 cm et 5 cm) sont également prises avec un thermomètre de mercure pour évaluer l'influence de l'insolation de la paroi et l'impact de la condensation de la vapeur d'eau sur le processus de dégradation, impact notoire durant les heures du lever du jour lorsque la t° est basse et l'humidité relative très haute.

- Mesures d'évaporation

*Autant la littérature scientifique mentionne-t-elle les mesures d'humidité et de température de surface des matériaux, autant elle ignore les mesures d'évaporation. Celles-ci apparaissent pourtant indispensables dans la mesure où les résultats obtenus avec de telles mesures pourraient être directement corrélés au processus de cristallisation des sels présents dans le réseau capillaire du matériau. Ainsi, des mesures saisonnières d'évaporation, associées à l'évaluation d'autres paramètres climatiques et à d'autres mesures (température, humidité relative de l'air ambiant, force des vents, degré d'ensoleillement, mesures de mouvement de la nappe phréatique, hauteurs de pluviométrie, etc.), permettraient de mieux cerner les facteurs agissant sur l'activité destructrice de l'humidité et des sels. Lors d'une récente mission en Iran (avril 1999), dans le cadre du projet de conservation du site de Tchoga Zanbil (Khuzistan), entrepris par ICHO-RCCCR de Téhéran (Iranian Cultural Heritage Organization), avec le concours de l'UNESCO et de la coopération culturelle du Ministère des Affaires Etrangères du Japon, **Kunio Watanabe**, de la Faculté d'Ingénierie de l'Université de Saitama, nous a informé de recherches qu'il mène depuis ces 10 dernières années sur cette question des mesures d'évaporation des matériaux de construction. Ces recherches lui ont permis, avec d'autres chercheurs et un partenaire industriel, de mettre au point un équipement spécifique actuellement en cours d'expérimentation sur plusieurs sites, au Japon, au Canada, pour une mise au point qui permettra sa plus large utilisation. Nous avons eu l'occasion d'observer l'utilisation de cet équipement testé sur le sommet de la ziggourat de Tchoga Zanbil, en plein soleil, puis sur le mur de l'enceinte sacrée du Témenos, à l'ombre, ce mois d'avril 1999. Le procédé est par ailleurs décrit dans plusieurs publications successives, d'une part un rapport technique du nagra (National Cooperative for Disposal of Radioactive Waste, Suisse, 1992) et une autre communication présentée lors du 7^{ème} Congrès International de AIGI, Balkema, Rotterdam, (1994), que le Professeur K. Watanabe a bien voulu mettre à notre disposition. Ces documents présentent l'idée de base qui a été exploitée pour mettre au point cette mesure d'évaporation sur le terrain, et son principe de fonctionnement. Il s'agit en fait d'une sonde munie de capteurs (permettant de mesurer la température (T) et l'humidité relative (HR) reliés à un micro-ordinateur préalablement programmé et calibré pour rendre compte de ces mesures. Les mesures sont prises simultanément, toutes les 20 secondes. K Watanabe nous a précisé que ces mesures de « T » et de « HR » peuvent être prises avec une précision de $\pm 3\%$ si HR est inférieur à 90 %. Il peut donc être nécessaire de recalibrer les capteurs avant et pendant la prise de mesures pour corriger le calcul du flux de vapeur. Ainsi, à partir de la mesure de « T » et de « HR », on peut calculer une valeur d'humidité absolue (en gr/m^3), puis le gradient d'humidité absolue en $\text{gr/m}^3 - \text{gr/m}^2 / \text{m}$, mesure qui, multipliée avec le coefficient de diffusion ou de vapeur, donne la mesure d'évaporation. Une campagne de mesures sur une durée de 200 jours, avec plusieurs sondes, a été réalisée au Japon, sur un ancien bâtiment de briqueterie, abandonné et en cours de réhabilitation. Elle a permis de rendre compte très clairement, et pour des orientations différentes, de la relation entre les mesures d'évaporation et les taux d'humidité du matériau, comme avec la présence de sels. Les abaques de lecture des résultats, journalières ou mensuelles, saisonnières, traduisent l'évidence de cette activité d'évaporation, en fonction des périodes de l'année. Il conviendra de suivre l'aboutissement de ces recherches et de leur applicabilité aux matériaux de construction en terre crue, domaine sur lequel travaille actuellement K. Watanabe.*

• Les analyses de propriétés en laboratoire

Nous avons évoqué ces analyses de laboratoire mais il convient d'y revenir plus en détail car ce sont ces analyses qui retiennent principalement l'intérêt de la plupart des auteurs de la littérature scientifique.

- La granularité ou texture

La plupart des auteurs relèvent l'importance de cette analyse et référencent plusieurs procédures. L'analyse granulaire quantitative par tamisage et par sédimentométrie est la plus couramment évoquée, car assez systématiquement pratiquée. On trouve des descriptions très complètes de la procédure d'analyse dans H. Houben et H. Guillaud, (ibid) et dans **J.M. Teutonico** (1988). L. Dassler (1990) relève l'intérêt de réaliser une sédimentométrie « qualitative » selon la procédure établie par **J. Ashurst** (1988). **R. Hartzel** (1996) référence la distribution granulaire par tamisage, selon la norme ASTM D422 et préconise l'ajout d'un dispersant de la fraction argileuse, du métaphosphate de sodium, pour la sédimentométrie réalisée dans une solution d'eau déionisée. Il suggère également que cette analyse granulaire soit complétée par une description des particules du sol, notamment de la fraction $> 0,075$ mm par un examen au stéréomicroscope et sous une source lumineuse halogène générée par fibre optique. Cette analyse permet de préciser la rondeur et la sphéricité des grains, leur couleur, et la présence de matières organiques. Si la procédure classique d'analyse granulométrique par tamisage est relativement simple à réaliser, tout en mobilisant un matériel de laboratoire de base très accessible, l'analyse des fines par sédimentométrie est relativement longue puisqu'elle peut durer près de 48 heures. Ainsi, plusieurs chercheurs ont tenté de mettre au point des procédures simplifiées, essentiellement pour gagner du temps, tout en visant à réduire l'équipement de laboratoire et surtout à réduire les coûts d'analyse. **A. Mesbah et M. Olivier** (1990) proposent un essai simplifié de granulométrie-sédimentométrie « rapide ». Il s'agit d'exploiter le principe de la poussée d'Archimède pour déterminer la masse sèche des différentes fractions granulaires du matériau. Celui-ci est introduit dans une éprouvette graduée immergée dans un bac de flottaison et par une simple lecture des niveaux d'eau, à l'intérieur et à l'extérieur de l'éprouvette, on peut calculer le niveau d'eau déplacé qui correspond en fait au volume du matériau. Le poids du matériau est obtenu en multipliant le volume par la densité sèche des grains du matériau. Cette procédure évite l'utilisation d'une balance et d'une étuve pour sécher le matériau humide et réduit considérablement le temps de l'analyse granulaire quantitative classique. Enfin, l'évolution récente des techniques d'analyse permet désormais d'effectuer l'analyse de texture au granulomètre laser. La littérature révisée en fait peu cas. Nous l'avons trouvée mentionnée dans un rapport de **H. Houben** (1997), à propos d'une étude de cas sur le « *Desert Development Demonstration & Training Building* » de Sadat-City, Egypte. Le rapport mentionne diverses analyses effectuées sur des prélèvements d'échantillons par un laboratoire des Ciments Lafarge. L'équipement répertorié est un granulomètre laser LS qui permet une grande rapidité d'exécution de l'analyse granulaire quantitative, soit sur 65 secondes, et qui donne une très grande précision sur le volume des particules pour la gradation la plus complète s'étalant entre $0,04 \mu\text{m}$ et $2000 \mu\text{m}$. Cette analyse au laser permet de bien préciser les mesures pour des diamètres de grains « sensibles » correspondant notamment aux fines actives mais aussi aux fractions sableuses « structurantes ». Cette procédure est pour l'instant loin d'être couramment pratiquée et ne peut l'être qu'en bénéficiant ou en faisant appel aux services d'un laboratoire de très haut niveau d'équipement (grandes

entreprises de ciments et bétons). Pour compléter cette révision sur la question de l'analyse granulaire, remarquons que la littérature scientifique traduit aussi un intérêt pour la question de l'interprétation des résultats d'analyse. Ainsi, **A. Demehati** (1990) du CRR/LPEE au Maroc, propose une interprétation simplifiée de la courbe granulométrique par la connaissance des taux pondéraux de certaines fractions de grains. Pour l'auteur, le pourcentage des éléments de $\varnothing > 2 \text{ mm}$ et celui des éléments de $\varnothing < 80 \mu$ permettent de cerner la texture globale du sol. Par ailleurs, **P. Poupet et C.A. De Chazelles** (1989), à propos d'analyses effectuées sur le site archéologique de Lattes, France, proposent de compléter l'interprétation des indices granulométriques cumulatifs classiques par une interprétation de courbes cumulatives semi-logarithmiques en application de la méthode Rivière (1977) qui repose sur l'utilisation des diamètres équivalents de particules et des pourcentages réduits. Les diamètres équivalents correspondent à la transformation des diamètres réels, obtenus par tamisage. Les pourcentages réduits prennent en compte les limites du spectre granulométrique au delà de la fraction fine réellement mesurée. Les calculs permettent aussi d'éliminer les dimensions les plus grossières. Toutefois, comme pour la méthode classique, les paramètres ou indices d'évolution granulométrique servent de support à l'interprétation mais ils caractérisent l'ensemble de la courbe granulométrique et non plus certains points particuliers comme les fractiles (ou indices granulométriques numériques). Une moyenne XM caractérise la grossièreté moyenne des sédiments. L'écart logarithmique moyen, ELGM, permet de préciser le degré d'évolution des sédiments selon leur niveau de déposition de l'amont à l'aval des cours d'eau. L'écart logarithmique absolu, ELGMA, comparé à ELGM, permet, selon l'importance de l'écart enregistré, de préciser le caractère plurimodal de la distribution des sédiments. Deux paramètres purement numérique, 11 et 12, caractérisent la distribution indépendamment de son étendue propre. Un indice granulométrique N permet aussi de caractériser le degré d'évolution des sédiments depuis l'amont à l'aval des cours d'eau et complète donc la lecture de l'ELGM. Ainsi, l'ensemble de ces indices granulométriques permettent de préciser la provenance des matériaux, leur mode de transport et de dépôt, leur évolution ou transformation, en bref, leur histoire.

- La plasticité

L'analyse de plasticité, qui permet de déterminer le comportement du matériau en présence d'humidité, effectuée en application de la procédure du suédois Atterberg est celle qui est le plus couramment référencée par la littérature. H. Houben et H. Guillaud, (ibid) en décrivent le mode opératoire comme d'ailleurs de façon encore plus complète, J.M. Teutonico (1988) dans son manuel de laboratoire édité par l'ICCROM. Beaucoup des auteurs révisés mentionnent l'analyse de plasticité par les limites d'Atterberg comme indispensable et en font état dans la présentation de leurs activités de recherche : L. Dassler (1990) qui fait référence à J.M. Teutonico, A. Demehati (1990), P.S. Jerome (1991) qui se réfère aux normes ASTM D423 et D424, R. Hartzel (1996), qui se réfère à la norme ASTM D4318, par exemple. Mais, concernant cette analyse, ce qui ressort comme étant le plus intéressant, c'est la mise en corrélation des différents paramètres en interaction. Au delà de la corrélation entre les valeurs des limites de liquidité (LI) et de plasticité (Lp), qui permettent de préciser la valeur de l'Indice de plasticité ($I_p = LI - Lp$), et donc les risques de déformation du matériau (plus I_p est élevé plus le gonflement de la terre par humidification et sont retraits par dessiccation sont importants), L. Dassler (1990) se réfère à H. Houben et H. Guillaud (ibid), pour rappeler la corrélation entre la propriété de plasticité du matériau et les propriétés de cohésion, d'activité et d'expansivité

des argiles. Ainsi, la relation entre I_p et I_L permet-elle de désigner le type de sol en présence, en se référant aux classifications géotechniques courantes (P & CH, France et USCS, USA). Ainsi cette même relation entre I_p et I_L permet-elle de préciser le degré de cohésion de la terre en la situant dans quatre zones : très fortement cohésif, fortement cohésif, moyennement cohésif et, légèrement cohésif. Ainsi, la relation entre I_p et la quantité d'argile (en %), fournit-elle une indication sur le degré d'activité des argiles de $\phi < 2\mu$, en situant les résultats de l'analyse de plasticité dans quatre zones : très actif, actif, moyennement actif et pas actif. H. Houben et H. Guillaud, (ibid), comme A. Demehati (1990), précisent que le rapport entre I_p et le % en éléments fins de $\phi < 2\mu$, donne la valeur du coefficient d'activité (A_c) permettant de se référer ensuite aux valeurs établies par Skempton pour préciser l'activité du sol, avec un sol peu actif pour une valeur de $A_c \leq 0,75$, un sol normalement actif pour une valeur comprise entre $0,75 \leq A_c \leq 1,25$, un sol actif pour une valeur de $A_c \geq 1,25$, et un sol très actif pour une valeur de $A_c > 2$. Ainsi encore, cette même relation entre I_p et la quantité d'argile (en %), donne-t-elle une précision sur l'expansivité de la fraction de mortier fin ($\phi < 0,4$ mm) en situant les résultats dans quatre zones : très forte, forte, moyenne ou faible expansivité. R. Hartzel (1996) relève également cette relation entre la valeur de I_p et l'expansivité du sol. D'autres auteurs, bien qu'assez rares, relèvent également l'intérêt de préciser la valeur de bleu de méthylène à la tâche (Vbta). Ils se réfèrent principalement à la norme française FP 18-592. On trouve cette référence chez A. Mesbah et M. Olivier (1990), chez A. Demehati (1990) et chez H. Houben (1997). La valeur de bleu de méthylène constitue en effet un paramètre d'identification mesurant globalement la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans un sable, en rapportant la valeur de bleu à la surface spécifique totale des argiles. Elle mesure la capacité des éléments fins en suspension dans de l'eau à adsorber le bleu de méthylène, par des dosages successifs et des prélèvements déposés sur un papier filtre, jusqu'à obtenir une tâche auréolée de bleu, persistante. Au delà d'une appréciation de l'activité des argiles, la valeur de bleu permet également de repérer certains caractères nocifs tel que l'absorption d'eau, la cohésion et le gonflement.

- Les matières organiques

L'identification de la présence de matières organiques est relevée comme importante par plusieurs auteurs. L. Dassler (1990), **R. Coffman, N. Agnew, G. Austin et E. Doehne** (1990), évoquent la possibilité de déterminer la quantité relative de composants organiques dans une terre par un test de combustion. Ce test résulte en effet en perte de poids de l'échantillon soumis au feu du fait de l'évaporation de l'eau incorporée ou de la destruction de matières organiques incorporées mais aussi de gaz volatiles contenus dans les matières non organiques (CO_2). Ce test reste tout à fait indicatif et ne précise pas la nature des composants organiques. Une autre manière de détecter la présence de matières organiques est précisée par H. Houben et H. Guillaud, à partir d'un essai standard accepté par l'ASTM et la BSI. Il s'agit d'agiter un mélange de terre et de solution d'hydroxyde de sodium puis à comparer la couleur obtenue avec une solution standard d'acide tannique. Ces mêmes auteurs évoquent également un test de dépistage de l'humus à partir de la préparation d'une solution de soude (NaOH) ou de potasse (KOH), à raison de 300 à 400 ml dilué à 3%, dans laquelle on incorpore une petite quantité de terre sèche brisée (50 à 100 g). Le mélange vigoureusement agité puis laissé au repos pendant 24 heures est ensuite observé. C'est alors la couleur de la solution qui surnage qui renseigne sur la présence d'humus. On notera également que C.S. Silver (1990) évoque l'analyse du milieu organique par l'application de colorants

histochimiques, notamment pour déterminer la présence d'hydrates de carbone, de protéines collagènes et de lipides.

En complément de l'analyse des matières organiques, quelques rares auteurs s'attachent à évoquer la détection de présence de fibres dans le matériau, blocs d'adobe ou enduits à base de terre. Il s'agit d'analyses microscopiques d'échantillons de matériaux réalisées en lumière polarisée et complétées par des analyses macroscopiques et microscopiques de sections d'échantillons (L. Dassler, 1990), ou d'examen microscopique en lumière réfléchie permettant de détecter la présence de paille ou de leur empreinte négative après décomposition (P.S. Jerome, 1991). Par ailleurs, **J. Sramek et L. Losos (1990)** évoquent la complémentarité de l'analyse thermique différentielle (ATD) et de la thermogravimétrie (TG) qui, au delà de l'aspect minéralogique peut aussi révéler la présence de matériau organique. En suivant le comportement des échantillons analysés au fur et à mesure d'une augmentation de la température (de 100 à 900° C. dans le cas évoqué), il est possible de détecter des pics « exothermiques » précisant la présence de matériaux organiques comme paille hachée, poils d'animaux et composants humifères.

- Le retrait

Revenant sur la propriété de retrait du matériau qui permet de déterminer ses variations de volume en présence d'humidité, on remarquera que peu d'auteurs y accordent un intérêt. R. Hartzel (1996), retient le principe de réalisation d'un test de retrait linéaire et volumétrique dans l'optique de prédéterminer la présence d'argiles instables (montmorillonites, smectites, bentonites). Le principe du test n'est pas explicitement décrit mais semblerait référer à la procédure courante d'Alcock en évaluant les résultats par rapport à une échelle de valeur de retrait, en pourcentage, correspondant à la typologie des minéraux argileux. Ainsi, un retrait de 3 à 10 % correspond à une dominante de kaolinites, un retrait de 4 à 11 % à une dominante d'illites, et un retrait de 12 à 23 % à une dominante de smectites/montmorillonites. R. Hartzel propose que cette mesure de retrait linéaire soit complétée par une mesure de retrait volumétrique en application de la norme ASTM D4943. Par ailleurs, A. Demehati (1990) propose la prise en compte d'une valeur de « retrait relatif » (RR) qui résulte de l'interaction de plusieurs paramètres, à savoir, le produit de la différence entre la Limite de liquidité (LI) et la Limite de retrait (Lr), par le rapport du poids volumique apparent sec (γ_d) et de la masse volumique de l'eau (γ_w). Le résultat de cette équation, en pourcentage, donne la mesure de ce « retrait relatif » (RR), avec, pour $RR \geq 70 \%$, des sols à très fort retrait, pour $50 \% \leq RR < 70 \%$, des sols moyennement rétractables, et pour $RR < 50 \%$, des sols faiblement rétractables.

- Les carbonates et les sels solubles

L'analyse de la présence de carbonates et des sels solubles est sans aucun doute l'analyse sur laquelle reviennent la majorité des auteurs que nous avons révisés. Plusieurs procédures de laboratoire sont évoquées. P.S. Jerome (1991) évoque la mesure de carbonate de calcium (CaCO_3) par la réalisation de tests analytiques au coulomètre utilisant le principe de la digestion du carbonate de calcium par de l'acide hydrochlorique. Ce principe connu est également relevé par R. Hartzel (1996) à propos de l'analyse de sols de la région du sud-ouest des USA souvent riches en calcite, caliche ou carbonate de calcium, ou en dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). La procédure est similaire et s'opère à l'aide d'une solution d'HCl diluée à 15 % qui digère la fraction soluble et acide des

carbonates. D'autres auteurs relèvent le risque de manipulation de tels produits et proposent des solutions plus faiblement diluées (5 %). Revenant sur la valeur de pH, au delà des mesures simplifiées à l'aide de papier pH ou autres kits étalonnés, on aura remarqué chez **S. Skibinski** (1991), l'évocation d'une procédure de laboratoire plus élaborée, en application de la normalisation polonaise. Il s'agit d'une analyse au pHmètre qui s'opère sur des échantillons de matériaux triturés de façon à obtenir une taille de grains $< 0,104$ mm. Ce matériau est ensuite séché à une t° de 60° C. et l'analyse porte sur des extraits ajoutés d'eau distillée à raison de $10 \text{ cm}^3/\text{g}$. Les échantillons sont ensuite agités mécaniquement durant 1 heure et filtrés deux fois par décantation à l'aide d'une pissette de 100 cm^3 . Ce sont alors ces extraits aqueux qui sont mesurés au pHmètre.

Pour l'analyse des sels la littérature référence surtout la réalisation de tests microchimiques, comme en témoignent L. Dassler (1990), P.S. Jerome (1991) ou encore R. Hartzel (1996). La procédure est bien établie. Il s'agit de tester le matériau à l'aide de produits chimiques étalonnés correspondant à des types précis de composants chimiques, sels solubles, sels acides, sels alcalins. R. Hartzel (1996) précise que cette analyse qualitative des sels solubles s'opère en plongeant un échantillon de masse connue dans de l'eau déionisée pendant trois heures, préparation qui devra être filtrée avant d'être soumise aux tests microchimiques visant à détecter la présence des sels solubles dont parmi les plus actifs, les anions de chlorides, de sulfates, de phosphates et de nitrates. H. Houben et H. Guillaud, (ibid), proposent un essai de détection des chlorures et des sulfates en observant des précipitations à base de solutions de chlorure de baryum (BaCl) pour les sulfates, ou à base de nitrate d'argent (NO_3) pour les chlorures. P.S. Jerome (1991) apporte des précisions sur les types de produits réactifs qu'il convient d'utiliser de façon à obtenir les réactions de précipitation colorée spécifiques. Pour les chlorides, un réactif composé de 3 M d'acide nitrique et de 0,5 M de nitrate d'argent ; pour les sulfates, 3 M d'acide hydrochlorique ajouté de 0,3 M de solution de nitrate de baryum ; pour les nitrates, une solution de dyphénylamine dans de l'acide sulfurique et, pour les phosphates, 6 M d'acide nitrique avec du molybdate d'ammonium. L'auteur relève toute l'importance de la détection des nitrates, sels très absorbants d'eau et très présents dans les cycles d'évaporation-cristallisation, et donc particulièrement actifs dans le processus de dégradation du matériau. Ce processus résulte de la migration des sels par capillarité suivie d'une cristallisation dans les vides (pores, canaux) du matériau, et d'une expansion par suite d'évaporation qui est à l'origine de contraintes de tension détériorant le matériau. Tout en relevant que l'analyse quantitative des sels est plus difficile à réaliser sur de petites quantités de matériau souvent non homogènes qui peuvent être peu représentatifs de la nature plus « globale » du matériau, P.S. Jerome relève que l'analyse quantitative des nitrates peut être opérée avec un « *EM Quant Test Strips* », et pour les phosphates à l'aide d'un « *Hatch Kit Model PO-24* ». Les résultats quantitatifs sont alors précisés en parties par million (ppm). On aura aussi relevé une référence à l'analyse des sels solubles par fluorescence X, chez H. Houben (1997). Cette procédure permet de préciser le volume en pourcentage d'une large typologie d'oxydes, dont l'oxyde de magnésium (MgO), l'oxyde de calcium (dont CaO libre) ou présence de carbonates, l'oxyde de potassium (K_2O), l'oxyde de sodium (Na_2O), mais aussi de l'anhydride sulfurique (SO_3) ou la présence de sulfates. Enfin, par ailleurs, R. Coffman, N. Agnew, G. Austin et E. Doehne (1990), rendent compte d'un programme de recherche sur la consolidation et la préservation des structures historiques en terre mené au GCI. Ils évoquent des analyses, tests et expérimentations réalisés sur des échantillons de briques d'adobe prélevés sur différents sites historiques (Chine, Egypte, El Salvador, Israël), qui sont

comparés à des adobes de production récente fabriquée au Nouveau Mexique et en Californie. Il s'agit de détecter la présence de composants solubles (carbonates de calcium et de magnésium, sulfates) par une analyse d'EDTA (« Ethylene Diamine Tetra Acetic acid »), permettant de dissoudre la calcite sans affecter les autres composants (complexification des ions de calcium). Cette analyse d'EDTA est complétée par des expérimentations de lessivage. Il est supposé que le matériau lessivé inclurait tous les carbonates et les sels (sulfates et/ou chlorides) mais non les silicates et les oxydes. Notons au passage, que l'EDTA est aussi utilisée sur le sel de sodium, pour réguler le pH en remplaçant un à 4 des hydrogènes par des sodiums, le tétra sodium étant un composé dont le pH est proche du neutre (d'ap. William S. Ginell, GCI, 1999).

- La minéralogie

Dans la majorité des protocoles d'analyse de laboratoire présentés par la littérature scientifique, l'analyse minéralogique des fines silteuses et argileuses, est sans aucun doute l'analyse relevée comme la plus indispensable et devant être systématiquement réalisée. Ce sont des analyses très précises que seuls des laboratoires bien équipés et des techniciens compétents peuvent réaliser et interpréter. Notons également que ces analyses sont coûteuses et donc pas toujours accessibles aux opérateurs, selon les contextes de travail. Les principales procédures qui sont mentionnées sont connues. Il s'agit pour l'essentiel de l'analyse diffractométrique aux rayons X (XRD) ou de l'analyse thermique différentielle (ATD). Ce qui semble plus intéressant à relever, c'est la recherche d'un degré de finesse dans l'identification des minéraux, au plan qualitatif et quantitatif, en jouant sur la complémentarité des modes d'analyse et sur l'utilisation accrue des techniques plus récentes d'analyse au microscope électronique. Pour ce qui est de l'analyse minéralogique par diffraction aux rayons X, P.S. Jerome (1991) relève que la préparation des échantillons (tamisés à 40 µ) est relativement longue, minutieuse et fastidieuse, notamment pour éliminer, autant qu'il est possible, les pics d'arrière-plan d'alumine, de silice, des oxydes de fer et des carbonates. Au delà de l'énoncé de cette analyse connue, l'auteur relève l'intérêt de compléter par une étude des diffractogrammes qui peut fournir des informations intéressantes sur d'autres traces de minéraux moins immédiatement identifiables. Elle propose également de compléter cette analyse par une observation d'échantillons de 30 µ, au microscope pétrologique. Sur cet aspect de la complémentarité des modes d'analyse, P.S. Jerome relève aussi l'intérêt de réaliser une analyse de la morphologie des argiles en microscopie électronique au scanner (SEM) venant compléter l'analyse aux rayons X en énergie dispersive (EDXA), de façon à identifier des particules plus discrètes mais aussi à préciser la composition des éléments pour des parties plus spécifiques du matériau. C.S. Silver (1990) propose la complémentarité des analyses XRD, SEM et EDS (« Energy-dispersive »). Concernant l'analyse des propriétés des enduits, mortiers et peintures en terre, nous avons également noté, à propos d'une recherche sur la « Mug House » du site nord-américain de Mesa Verde conduite par R. Hartzel, K. Fiero, F. Matero, L.A. Dix et J. Trott (1997), cette même complémentarité des analyses XRD et SEM, complétée par une EDXA (« Elemental dispersive x-ray analysis ») permettant de confirmer la composition des pigments picturaux préalablement identifiés par des tests à base de produits chimiques réactifs. Apportant une précision sur la procédure d'analyse XRD, L. Dassler (1990) précise que les échantillons préparés doivent être analysés à l'état sec et à l'état saturé (à l'éthylène glycol). Cette analyse à l'état saturé fait mieux apparaître les traces de minéraux argileux expansifs comme les smectites, par

exemple. S. Skibinski (1991) propose une séquence d'analyses sur une préparation de matériau pulvérisé qui fait suivre l'observation au microscope optique en lumière normale et polarisée, puis à l'aide d'un spectrophotomètre à infrarouges, et enfin une XRD. Deux types d'échantillons sont testés. D'une part des échantillons présentés à l'observation spectrophotométrique et utilisant des diffractogrammes de préparations dites « orientées », c'est à dire saturées en solutions de sels de magnésium, de potasse et calcium, et de glycérine. D'autre part des échantillons préalablement soumis à un traitement thermique à la température de 550° C qui seront analysés en XRD. Ce protocole se réfère à la norme polonaise. J. Sramek et L. Losos (1990), évoquent la complémentarité de l'analyse thermique différentielle (ATD) et de la thermogravimétrie (TG) qui fournit une mesure de la quantité et des types de minéraux argileux. Le spectre des différents pics obtenus à différentes températures permet de caractériser les minéraux argileux. Enfin, concernant plus précisément la caractérisation des anciens mortiers, F. G. Matero (1994), fait référence à des travaux de G. Capannesi, C. Seccaroni, A.F. Sedda, V. Majerini et S. Musco (1990) évoquant « *l'Instrumental Neutron Activation Analysis* » (INAA). Cette analyse permet de préciser les concentrations d'éléments. Par suite, le traitement des échantillons à l'HCl sépare la fraction calcaire soluble et la fraction pouzzolannique et sableuse insoluble. Les insolubles sont alors soumis à une autre phase d'activation neutronique pour préciser les éléments de composition de l'enduit.

- Mesures de porosité, porométrie, perméabilité et capillarité

Il est remarquable de noter que peu des auteurs révisés mentionnent l'intérêt et l'importance d'analyser les propriétés de porosité et de capillarité du matériau alors que celles-ci sont à l'origine de phénomènes de dégradation typiques et souvent très destructeurs. Les références que nous citons présentent aussi l'intérêt d'une mise en relation des propriétés, des mesures et des paramètres.

Sur la porosité, sans préciser la procédure d'analyse, P.S. Jerome (1991) évoque une méthode de calcul du rapport entre les vides et la partie solide du matériau, par stéréologie quantitative. Elle mentionne aussi l'intérêt de réaliser un examen microscopique en lumière réfléchie de façon à mieux déterminer la dimension et la distribution de fissures, pores et vides, et donc de préciser par l'évaluation d'un indice des vides, la porosité du matériau. Cet examen est également rapporté à la détection de la présence de sels qui peuvent opérer un processus de cristallisation et d'expansion, dans ces cavités. S. Skibinski (1991), à propos de tests réalisés sur des adobes du site équatorien de Agua Blanca et du site péruvien de Cahuachi, relève l'interaction des mesures de densité apparente (g/cm^3) et d'absorbibilité gravimétrique (%) pour déterminer la porosité ouverte du volume (%) et la vitesse de remontée capillaire (cm/minute). Ce même auteur relève aussi l'intérêt de confronter les résultats de mesures de résistance du matériau, opérées par analyse acoustique aux ultrasons, avec les observations macroscopiques sur l'importance apparente des processus de dégradation du matériau, qui permettent alors de tirer des conclusions sur l'activité des facteurs de dégradation, par exemple les sels, mais aussi la relation entre l'hygroscopicité, l'absorbibilité gravimétrique et la porosité ouverte. Par ailleurs, M. Dayre et E. Kenmogne (1993), se sont intéressés à l'influence de la structure des terres sur le transfert d'humidité, ou plus précisément sur l'influence de la granularité des terres dans les processus de migration d'eau au sein de blocs de terre compactés. Ils proposent d'étudier cette relation par analyse spectrométrique aux rayons gamma. Il s'agit d'analyser les effets de

l'humidification progressive résultant de la remontée capillaire dans un bloc dont la base est maintenue dans l'eau. Le banc gammamétrique permet, par le déplacement vertical de l'ensemble source-détecteur, de suivre l'évolution de la teneur en eau volumique à différentes cotes de hauteur de l'échantillon. On doit procéder à un premier balayage du bloc sec avant humidification puis à des balayages successifs jusqu'à obtention de la valeur constante de teneur en eau. La teneur en eau volumique θ rapporte le volume d'eau au volume total de l'échantillon qui le contient. La teneur en eau massique w est liée à par la relation $\theta = w \times ds$, dans laquelle ds est la densité de l'échantillon sec. Les résultats obtenus, figurés sous forme de profils hydriques (courbe d'évolution de la teneur en eau en fonction du temps) permettent de déterminer les valeurs de la diffusivité hydrique à travers le matériau testé. M. Dayre et E. Kenmogne considèrent que « parmi les paramètres structuraux susceptibles de présider aux transferts d'humidité, la porosité, la porométrie et la surface spécifique jouent un rôle primordial ». Ils proposent d'associer l'analyse gammamétrique à des mesures de porométrie et de perméabilité. Ils font l'hypothèse que l'observation de fortes diffusivités peuvent s'expliquer par la présence d'une faible proportion de pores de petite taille, siège de la remontée capillaire. A *contrario*, les diffusivités moindres peuvent être liées à une forte surface spécifique ralentissant les transferts et réduisant la perméabilité. On aura aussi noté que S. Skibinski (1991) mentionne une étude du transfert de l'eau phréatique par les forces capillaires, sur la base de murs en adobe, fondée sur une analyse multispectrale d'images VHS, par ordinateur. Cette méthode a été élaborée par l'Institut de Recherche et de Conservation des Biens Monumentaux de l'Université Nicolas Copernic (Pologne). On analyse les spectres visuels de la paroi sur les échelles monochromatiques rouge et bleue. Les changements de température de la surface de la paroi se définissent en variations de la couleur rouge. Les différences des propriétés physiques du matériau sont décrites par les variations de la couleur bleu. Ces analyses prouvent la présence d'eau capillaire dans la base des murs d'adobe.

• **Classification des sols**

Au terme de cette révision des procédures d'identification des propriétés du matériau terre, par des analyses préliminaires de terrain et de laboratoire, il convient aussi de faire le point sur les classifications des sols dont peuvent disposer les opérateurs. Celles-ci renvoient à d'autres données descriptives sans doute fort utiles pour parfaire l'identification des sols, connaître leurs éléments de composition et leurs propriétés physiques, ainsi que leurs caractères biochimiques.

La littérature scientifique que nous avons révisée ne fait en général pas état de ces considérations sur la classification des sols. Nous devons encore souligner la synthèse proposé par H. Houben et H. Guillaud, (ibid), qui présente les principales classifications des sols utiles, de type pédologique et géotechnique.

Les classifications pédologiques prennent en général en compte l'ensemble des profils des sols et renseignent sur leurs processus de formation et d'évolution. Ces classifications s'appuient essentiellement sur trois ensembles de données :

- le degré d'évolution et de différenciation des profils de sols ;
- le mode de formation et d'altération des argiles ;
- les processus physico-chimiques de base qui sont à l'origine du sol, souvent liés aux matières organiques.

Ainsi, la présentation simplifiée de la classification de **Ph. Duchaufour** (Atlas écologique des sols du monde, 1976) permet de distinguer deux grandes familles de classification des sols :

- les sols dont la pédogenèse est très liée à l'évolution des matières organiques, généralement sous climats tempérés et froids ;
- les sols dont la pédogenèse est assez indépendante de l'évolution des matières organiques, très liée au contraire aux climats chauds, plus ou moins humides et au comportement particulier des oxydes de fer et d'alumine.

Les auteurs relèvent que l'on peut trouver des tableaux de correspondance entre les diverses classifications pédologiques disponibles. En complément des classifications pédologiques, les atlas pédologiques fournissent des descriptions très complètes des sols en rapprochant des paramètres tels que localisation, topographie, nature de la roche mère (géologie), climat et végétation. Ils décrivent précisément le profil et la morphologie des sols selon les différents horizons, horizon de surface (A), horizon structural ou d'altération (B) et matériau originel (C). Ces atlas peuvent aussi décrire les principaux caractères géochimiques et biochimiques en renseignant sur la granulométrie et les minéraux argileux dominants, sur le complexe absorbant et la biochimie. Enfin, ils peuvent également préciser le processus d'évolution des sols.

Les classifications géotechniques présentent également un grand intérêt pour la description des principales propriétés des sols en rapport avec leur désignation géotechnique. Houben et Guillaud proposent une version simplifiée des classifications P & CH (Ponts et Chaussées, France) et USCS (USA). La désignation des sols graveleux et sableux, groupés sous l'appellation de « terres grenues », se fait au regard de l'importance de la fraction granulaire de $\varnothing > 0,08$ mm et dans cette fraction de la quantité de grains de $\varnothing > 2$ mm (terres graveleuses) ou de $\varnothing < 2$ mm (terres sableuses). Pour la désignation des terres fines, silteuses et argileuses, la désignation se fait, inversement, au regard de l'importance de la fraction granulaire de $\varnothing < 0,08$ mm, mais également au regard de la valeur de la Limite de Liquidité (LI), soit pour une valeur < 50 % pour les silts et les silts argileux, et pour une valeur de LI > 50 % pour les argiles. On remarquera aussi, dans cette classification simplifiée présentée par les auteurs, l'intérêt d'une relation entre des essais géotechniques de terrain (analyses préliminaires) et la désignation des terres fines de nature silteuse et argileuse. Les essais pris en compte sont la résistance à sec (pastille), le ressuage, la consistance (cordon reformé en boule) et la cohésion (cigare ou ruban).

I.2.3. - La caractérisation des matériaux

• Les opérateurs démunis face au vide normatif

Au delà des analyses, tests et essais de terrain et de laboratoire, qui visent à identifier le matériau et donc à garantir une bonne connaissance de ses propriétés, les matériaux de construction en terre, comme tout autre matériau, peuvent être soumis à des essais visant à mieux caractériser leur comportement et leurs performances. Pour autant, si les procédures d'essais de caractérisation de la plupart des matériaux « traditionnels » (pierre, bois, p.e.), sont bien établies et normalisées, ce n'est pas encore le cas pour les matériaux en terre, même si des avancées notoires ont été réalisées au cours de cette dernière décennie. Ces progrès de la standardisation sont liés à une réactualisation de l'emploi des matériaux à base de terre en construction, dans le domaine des techniques historiques, comme l'adobe ou le pisé, ou dans celui d'une technique moderne qui connaît une progression significative, le bloc de

terre comprimée. Mais, ce qui peut servir de référence normative dans le domaine de la construction en terre contemporaine n'est pas aussi directement applicable au domaine de la conservation des sites archéologiques ou des édifices historiques bâtis avec les mêmes matériaux. Ainsi, les opérateurs de la conservation des patrimoines architecturaux en terre sont-ils aujourd'hui très démunis lorsqu'ils doivent réaliser des essais de caractérisation qualitative ou de performance des matériaux qu'il envisagent de mettre en œuvre pour réparer telle ou telle partie d'un édifice ou pour engager un processus de restauration. Les rares références disponibles relèvent alors davantage du domaine des cultures constructives et des savoir-faire, c'est à dire de pratiques généralement non codifiées. Même si on peut reconnaître l'existence d'un « art de bâtir en terre » pouvant fonder des garanties de qualité pour des interventions de restauration, cela apparaît très insuffisant lorsqu'il s'agit d'engager un processus de conservation souvent très complexe et mobilisant des procédés, des techniques, des matériaux et des produits insuffisamment expérimentés pour fonder un niveau acceptable de référence utile aux opérateurs. La conservation du patrimoine architectural en terre est une discipline nouvelle qui commence à peine à fonder sa spécificité et qui s'interroge aujourd'hui sur la nécessité de se structurer en « science », de façon à établir ses savoirs théoriques comme ses pratiques. Cette structuration de la pensée scientifique devra concrètement déboucher sur la mise à disposition d'outils de référence indispensables aux opérateurs, de façon à mieux garantir la qualité des actions conservatoires. Le chemin qui mène à cet aboutissement sera encore long à parcourir. En attendant, les opérateurs se « débrouillent » et fondent leurs références petit à petit, souvent au coup par coup, aux interfaces des normes existantes couvrant d'autres matériaux, d'autres pratiques conservatoires, et de leurs expériences. Lorsqu'il s'agit de réaliser des essais de caractérisation des matériaux, de produits ou de dispositions particulières de conservation, les opérateurs utilisent, modifient ou adaptent avec souplesse les références normatives qui font office de loi dans les contextes d'intervention. Mais comme la littérature scientifique le montre, le besoin de se référer à un cadre normatif est largement exprimé confirmant sans doute une recherche de garantie technique et scientifique, mais aussi de légitimité, pour mieux fonder une adhésion aux pratiques.

• **Quels essais de caractérisation ?**

Les essais de caractérisation des matériaux de construction en terre qui sont le plus couramment référencés par la littérature technique et scientifique sont principalement hérités de la géotechnique, de la technologie des matériaux dits « poreux », des mortiers et bétons, et des travaux d'infrastructures routières. Ces essais, nombreux dans leur plus large acceptation, sont classés dans différentes catégories qui correspondent à différentes phases de la séquence globale de production des matériaux de construction. Cette séquence permet de distinguer :

- les essais d'identification (précédemment évoqués) ;
- les essais de mise au point ;
- les essais de performance ;
- les essais de caractérisation ;
- les essais de contrôle ;
- les essais d'acceptation.

Néanmoins, au regard de la littérature et des besoins exprimés par les opérateurs comme des pratiques constatées, on doit relever que ce sont essentiellement les essais de « performance » et de « caractérisation » qui retiennent l'intérêt de la communauté scientifique et donnent lieu à divers

programmes de recherches et d'expérimentations. De plus, dans la réalité des faits, très peu d'essais de ces deux catégories semblent être finalement pris en compte par les opérateurs car les procédures existantes ne répondent pas directement à leurs besoins et leurs attentes. On doit également constater que la littérature ne rend pas compte des tests de performance ou de caractérisation les plus couramment réalisés et dont les procédures héritées d'autres technologies de construction, sont bien établies et encore assez facilement adaptables au domaine de la conservation. Nous pensons notamment aux essais visant à définir les caractéristiques mécaniques des matériaux comme par exemple les résistances à l'écrasement (compression), à la traction ou à la flexion, au cisaillement, à l'élasticité qui peuvent être requis pour des chantiers de reconstruction-restauration-réhabilitation. De même pour certaines des caractéristiques hydriques comme le gonflement et le retrait, l'absorption et la perméabilité, la susceptibilité au gel ou aux intempéries (érosion). Ou encore pour ce qui concerne les caractéristiques physiques ou thermophysiques courantes telles que chaleur spécifique, conduction, amortissement, déphasage thermique, isolation.

Ainsi, dans l'ensemble de la littérature technique et scientifique que nous avons révisée, en nous attachant plus particulièrement à celle qui couvre le domaine de la conservation architecturale, rendant compte soit de recherches ou d'expérimentations, ou de pratiques de terrain (études de cas), nous n'avons finalement relevé que très peu d'information sur cette question des essais de performance et de caractérisation. Sont en effet principalement évoqués des essais de résistance aux intempéries, soit en conditions environnementales réelles, soit en condition simulée et/ou accélérée, des essais visant à caractériser la capillarité du matériau, des protocoles d'essais et de tests sur les mortiers et enduits à base de terre, des tests de développement sur des murets témoins en vue de tester des produits de consolidation physico-chimique, des solutions de protection de surface ou encore de drainage. On peut aussi, par ce constat, relever les préoccupations dominantes des opérateurs de la conservation lorsqu'ils sont confrontés à la recherche de solutions concrètes de préservation, de protection ou de consolidation des vestiges ou des structures en terre. Il s'agit pour l'essentiel de tester des solutions à même de développer une conservation préventive pouvant garantir un ralentissement optimal des processus de dégradation principalement causés par les facteurs météorologiques (intempéries, vent, ensoleillement), mais aussi de pouvoir garantir une réduction sensible des charges d'entretien. Il semble par contre que le choix des solutions soit encore davantage guidé par un souci d'intervenir sur les phénomènes, les symptômes ou les effets visibles des pathologies et que l'on néglige encore trop la recherche de solutions permettant d'intervenir sur les causes et même sur l'origine des causes des pathologies. Même si une tendance émergente semble vouloir mieux prendre en compte cet « amont » des problèmes, les engagements restent encore plus théoriques que pratiques.

• Révision des essais et tests dans la littérature

- Essais de performance

- Erosion du matériau aux intempéries

La procédure type de test d'érosion est connue. Elle consiste à exposer le matériau à une pluie artificielle simulée sous forme d'arrosage à l'aide d'une pompe maintenant une pression constante en amont d'une pomme d'arrosoir ($\varnothing$ de 10 cm), contrôlée par un manomètre et placée à une certaine distance du

matériau (20 cm), perpendiculairement à sa surface, durant un cycle de temps défini (2 heures). On effectue ensuite une mesure moyenne de la profondeur des dix-huit plus grands trous observés sur le matériau. Tel qu'il est conçu par les normes, dont la norme ASTM qui fait souvent référence, ce test est généralement considéré comme très dur et la plupart des matériaux traditionnels, non stabilisés ou consolidés, n'y résistent pas. Ainsi, devant ce test qui est le plus souvent rédhibitoire pour autoriser l'emploi du matériau terre, en construction neuve comme en restauration, les opérateurs ont-ils été placés devant l'obligation de modifier ou d'adapter la procédure normalisée. En Australie, **L. M. Schneider** (1987), du NBTC de Chastwood, a adapté la procédure normalisée ASTM en préconisant un arrosage sous pression constante de 50kPa pendant une heure. La profondeur d'érosion maximale autorisée est de 10 mm. **Russel Andrews** (1990) a été soucieux de mettre en œuvre un essai d'érosion simplifié, de terrain, avec l'Université Deakin de l'Etat de Victoria. Il s'agit d'exposer un bloc d'adobe positionné en inclinaison (angle de 30° à 45°) à une goutte d'eau continue pendant une demi-heure, 1 litre d'eau étant déversé goutte à goutte à une hauteur de 40 cm du bloc. La profondeur d'érosion maximale autorisée est de 8 mm. La résistance à l'érosion est considérée comme bonne entre 3 à 5 mm et satisfaisante entre 5 à 8 mm. Cet essai simplifié peut être utile à considérer pour préparer des interventions de réparation ou reconstruction partielle, voire de restauration, de structures en adobe

H. Saremkalali et F.H. Wittmann (1987), de l'Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse, rendent compte d'un test effectué sur des murets d'essais en briques de terre crue revêtus de produits hydrofugeant et/ou consolidant. Ce test est destiné à tester la résistance mécanique et à la pénétration de l'eau. Les murets sont exposés à un jet mobile simulant une pluie, suivant un débit « réglable », avec 2.8 l/m² heure pour simuler une pluie « violente ». Un muret de contrôle, non revêtu est associé aux murets traités. Le test fait l'objet d'observations macroscopiques durant la procédure d'essai et après. Les essais réalisés concluent à la non appropriation des produits hydrofugeants et consolidants sur les constructions en terre crue décrivant une teneur élevée en argile même si les murets traités semblent, *a priori*, se comporter mieux que les murets non traités. En effet, au delà d'un effet de « perlage » de surface qui confirme le rôle protecteur du produit, d'autres phénomènes de gonflement et de fissuration, puis d'écaillage, sont observés dans le temps. L'eau atteint alors la surface non protégée (au-delà de 5 mm) et détériore le matériau.

- Test de capillarité

A. Hakimi et A. Acharhabi (1987), du LPEE de Casablanca, Maroc, présentent un essai visant à tester la possibilité d'infiltration de l'eau de pluie à travers un mur. L'essai ne nécessite pas un gros équipement, est facile à mettre en œuvre *in situ* et ne dure qu'une demi-heure pour chaque emplacement sur les murs testés. Il s'agit d'utiliser une boîte ou « chambre » de perméabilité, boîte rectangulaire appliquée sur le mur et qui permet d'isoler une surface de pénétration à l'eau de 16 x 34 cm. L'étanchéité sur le pourtour de la chambre est assurée, soit par une bande de caoutchouc ou par un ruban de mastic. La chambre est maintenue contre le mur à l'aide d'une jambe de force métallique. Après sa mise en place, la chambre est remplie d'eau par un orifice placé en sa partie supérieure. Le remplissage étant terminé, le niveau d'eau est maintenu constant grâce à un tube de Mariotte gradué, dont le débit compense l'écoulement d'eau par percolation à travers le mur. On peut donc mesurer le

débit absorbé par le mur sous une charge d'eau constante moyenne de 15 cm, en prenant comme référence la surface d'écoulement. L'essai peut être intéressant pour les parties les plus exposées des murs de terre, soit à la base des murs qui peuvent souffrir du rejaillissement, soit pour les façades les plus directement exposées à la pluie. Il est sans doute moins intéressant pour les autres situations (parois courantes et façades moins exposées).

- Caractérisation et performance des mortiers et enduits

Dans le cadre de son programme de cours sur la protection de surface, présenté à l'occasion du 4^{ème} Cours International sur la Préservation du Patrimoine Architectural en Terre du Projet Gaia (ICCROM-CRATerre-EAG), **F.G. Matero** (1994), commente une bibliographie de référence sur la caractérisation des mortiers et enduits. Il relève l'intérêt de considérer les propriétés suivantes :

- la résistance en compression ;
- la résistance en traction ;
- la résistance au cisaillement ;
- la dureté ;
- l'adhérence ;
- le temps de prise ;
- le temps de cure ;
- l'hydraulicité ;
- la plasticité (ouvrabilité et teneur en eau) ;
- le retrait ;
- les coefficients d'expansion et de contraction (gel-dégel, thermique) ;
- la solubilité chimique ;
- la perméabilité et la porométrie.

La bibliographie de référence présentée par F.G. Matero couvre essentiellement le domaine des enduits sur les maçonneries de pierre. Néanmoins, pour notre domaine de la terre, par analogie ou extrapolation, des informations fournies par les différents auteurs répertoriés peuvent retenir l'intérêt. Par exemple, en discutant sur la compatibilité des techniques de restauration avec les matériaux anciens, **S. Peroni, C. Tersigni, G. Torraca et al.** (1982), relèvent l'importance des paramètres de tests et des propriétés qu'il convient d'analyser. Il s'agit notamment, pour les auteurs, de la résistance en compression, des coefficients d'expansion thermique, de la porométrie (taille et distribution), de la teneur en sels solubles, de la perméabilité à la vapeur d'eau et de l'extraction des matériaux alcalins.

On aura aussi noté dans le document proposé par F.G. Matero un rappel de l'ensemble des procédures standardisées ASTM visant à tester ou évaluer les peintures et les enduits. Ce sont ainsi 28 procédures normalisées qui sont répertoriées par l'auteur. Parmi les essais de performance présentés on aura relevé un essai de résistance à l'eau des enduits dans une ambiance de 100 % d'humidité relative qui mérite d'être évoqué. Il s'agit d'un essai réalisé en application de la norme ASTM D 2227 - 87. Des échantillons d'enduits sont placés dans une chambre close créant une ambiance d'air chaud saturé et de vapeur d'eau. La température de la chambre est de 38° C. (ou 100° F.). A 100% d'HR, une très faible différence de température entre les échantillons d'enduits et la vapeur environnante génère la formation d'une condensation sur les échantillons. La condition d'exposition est variable en sélectionnant la durée du test. L'eau pénètre dans l'enduit à un taux qui est dépendant de ses caractéristiques. Tous les effets comme le changement de coloration, le cloquage, la perte d'adhérence, le ramollissement ou la désagrégation sont

observés et rapportés. Ce test, assez dur, permet de mesurer l'efficacité d'un enduit après une certaine période de temps lorsque celui-ci ne donne pas d'évidence de dégradation dû à l'effet de l'eau.

Par ailleurs, R. Hartzel (1996) évoque la description des principales propriétés des mortiers. Devant le constat d'une réelle difficulté à définir un protocole de tests du fait de la grande lacune de textes normatifs spécifiques au matériau terre, Hartzel propose lui aussi une procédure dérivée des normes ASTM sur les mortiers de ciment, mais modifiés. Cette procédure comprend :

- un test de mouillage/séchage en application de la norme ASTM D 559 ;
- un test de gel/dégel en application de la norme ASTM D 560 ;
- le calcul du module de rupture en application de la norme ASTM D 1635 ;
- la mesure de transmission de vapeur d'eau en application de la norme ASTM E 96 ;

L'auteur rappelle également l'utilité d'observations macroscopiques et d'analyse de laboratoire avec :

- l'observation de la couleur ;
- l'analyse en microscopie électronique au scanner (SEM), mais en ne retenant que l'image électronique secondaire car les électrons secondaires sont « topographiquement » plus sensibles et permettent de révéler les caractéristiques de surface ainsi que la micromorphologie.

- Tests de contrôle de qualité

La littérature ne rend pratiquement pas compte de tests de contrôle de qualité effectués sur le matériau terre. Nous n'avons en effet relevé qu'une proposition d'un constructeur nord-américain visant à tester la compacité du pisé. F. Webster (1994) propose l'utilisation d'un indicateur de densité nucléaire. En effet, ces tests de contrôle de qualité sur la compacité du pisé sont en général opérés sur des éprouvettes cylindriques prélevées dans l'épaisseur du matériau. Webster considère que ce sont des tests « destructifs » et relève alors l'intérêt d'utiliser une procédure de test géotechnique proposée par la norme ASTM D2922-81 utilisant un indicateur de densité nucléaire, dans la mesure où la compacité peut être corrélée à la résistance en compression.

1.3. - Brève conclusion

La connaissance des caractéristiques et des propriétés du matériau terre, oblige à passer par un éventail d'analyses, de tests et d'essais, sur le terrain et en laboratoire, qui représente, dans l'acceptation complète de la procédure établie par les « standards » ou les « codes de bonne pratique », une démarche assez lourde à réaliser, prenant du temps, et sans aucun doute coûteuse. Mais il n'existe pas vraiment « une » procédure d'analyse complète universellement acceptée. La littérature montre clairement que les opérateurs acceptent assez unanimement des procédures d'analyse considérées comme « indispensables » pour permettre un bon niveau de caractérisation et de définition des propriétés du matériau, particulièrement pour les pratiques de laboratoire. Ce sont les analyses de distribution granulaire, ou de texture, par tamisage, complétées par une analyse des fines par sédimentométrie, se sont les analyses d'Atterberg pour la plasticité, ce sont enfin des analyses faisant appel à des équipements plus sophistiqués, pour définir la minéralogie des fines argileuses. Nous

reviendrons sur ce degré de sophistication « possible » et « acceptable » pour ce type d'analyses.

Mais, en amont, il convient de relever que les analyses, tests et essais de terrain, alors qu'ils sont bien référencés par la littérature, semblent finalement assez peu pratiqués par les opérateurs, sauf par des techniciens spécifiquement formés pour ce faire. Nous y repérons une lacune importante. Car, ces pratiques de terrain permettent à l'évidence de « pré »-caractériser et de « pré »-définir les caractéristiques et les propriétés du matériau terre. De fait, sur ces bases d'analyses de terrain, on peut envisager l'orientation d'une décision sur les choix d'analyses de laboratoire complémentaires qui devraient chaque fois être choisies pour leur caractère « indispensable » car ces analyses, coûteuses à très coûteuses, ne sont pas accessibles, financièrement, pour beaucoup d'opérateurs travaillant sur les sites, ne disposant que rarement de laboratoire locaux, ou sommairement équipés, et éloignés de laboratoires nationaux dont les niveaux d'équipement, selon les pays, sont encore très variables. On a d'ailleurs simultanément observé, au cours de ces dix dernières années, une pression de la demande en équipements d'analyses des terres, et de formation spécialisée des équipes de techniciens de laboratoire montrant qu'un réel besoin existe de par le monde, et qu'une importante lacune doit être comblée.

Tout est affaire de compromis, le plus efficace possible, entre les disponibilités en équipements et en compétences, entre les moyens financiers alloués au développement des projets de conservation et entre les contraintes ou potentialités des contextes géographiques (éloignement des sites des centres urbains équipés), et des contextes économiques (coût des transports). Chacun, selon ces moyens disponibles aura à s'adapter aux procédures existantes d'analyses, de tests et d'essais, pour atteindre un niveau de connaissance « suffisant et nécessaire » des caractéristiques et des propriétés du matériau. Bien sûr, lorsque des moyens plus complets sont disponibles et « accessibles », la procédure d'analyse peut accepter de passer par un certain niveau de sophistication des modes opératoires. Mais, nous sommes convaincus que toutes ces analyses plus complètes ne sont pas « toujours » indispensables. Perpétuel débat sur la fin et les moyens, dans leur réciprocity. Aussi conviendrait-il de mieux réfléchir à cette question de « l'adaptabilité » des procédures d'analyse, selon les types de matériaux, selon les contextes, pour mieux définir les cheminements opératoires absolument indispensables, « a minima ».

Par ailleurs, dans ce domaine particulier de la conservation du patrimoine architectural en terre, il conviendrait aussi, de mieux prendre en compte le principe d'intervention minimale, en intégrant davantage, au stade amont des analyses du matériau, des procédures non destructives ou très peu destructives. Etre vraiment sûr que toute intervention visant à collecter du matériau original, in situ, pour l'envoyer vers un laboratoire, soit toujours réversible. De même pour tout type de tests de développement, d'essais de contrôle et d'acceptation, en privilégiant des programmes sur des murs-tests plutôt que sur les structures originales elles-mêmes. Ou alors, si cela s'avère nécessaire pour des questions d'échelle (observations en vraie grandeur et en conditions réelles de traitements proposés), être là aussi bien sûr de la réversibilité. Cette disposition éthique semble être, fort heureusement, de plus en plus intégrée.

II - PATHOLOGIES ET DIAGNOSTIC DES ARCHITECTURES DE TERRE

II.1. - Liminaire

II.1.1. - Une phase fondamentale dans le processus de décision

Il ne peut y avoir de projet d'intervention sur un quelconque patrimoine, quels que soient les matériaux avec lesquels il est bâti, sans que l'on ait, au préalable, relevé puis étudié, analysé les pathologies dont il souffre. Le conservateur est bien le médecin de l'architecture qu'il entend conserver pour prolonger sa durée et la donner à voir aux générations futures. C'est sa vocation. A la fois généraliste et spécialiste, ce « médecin » de l'architecture se doit de bien identifier les maux dont souffre l'objet qu'il entend traiter. Mais au delà de la seule phénoménologie (constat évident des maux), puis de la symptomatologie (étude de l'expression des maux), long est le chemin qui permet de remonter aux causes puis encore plus en amont, à l'origine des causes des maux pour pouvoir, le plus scientifiquement possible, établir un diagnostic et établir des recommandations ou une « ordonnance » qui précisera les types de traitement à adopter ou les interventions à développer afin de garantir de bons soins. Au delà de cette métaphore aisée, il convient de s'interroger sur les méthodes et sur les outils de l'analyse pathologique et du diagnostic. Car c'est bien là que réside la pertinence comme la cohérence et l'efficacité de cette phase essentielle qui précède l'intervention et le traitement. Or, notre révision de la littérature, sur cette question, fait apparaître à la fois des lacunes au plan théorique et des inadéquations, des simplifications, des manques, sur le plan pratique. Beaucoup de progrès a été fait sur cette question au cours des quinze dernières années mais il reste encore beaucoup à faire pour dépasser les hésitations de l'expérimentation, les arbitraires de la décision et les empirismes de l'application. Suffisamment de réflexion et d'expérience sont aujourd'hui disponibles pour pouvoir, sans aucun doute, passer un nouveau cap de théorisation et d'efficacité pratique. Nous espérons que cette revue de la littérature du thème II « pathologies et diagnostic » pourra y contribuer.

II.1.2. - Mise en situation du propos développé

*Sur cette question des pathologies et du diagnostic de l'architecture de terre, dans l'optique spécifique de sa conservation, nous nous sommes principalement attachés à rendre compte de l'évolution de la pensée « théorique » et « méthodologique » au cours de ces 15 dernières années. La révision de la littérature nous a conduit assez naturellement à prendre cette option car il est apparu évident, au fur et à mesure des lectures, que **cette période correspond à une recherche visant en premier lieu à définir un positionnement théorique et méthodologique spécifique des chercheurs comme des praticiens de terrain.** Vers le début des années 80, on peut dire qu'il n'existe manifestement pas encore de « système de pensée » concernant cette question et que la réflexion investit peu à peu un champ nouveau prenant son autonomie. On peut donc suivre les développements de cette pensée spécifique avec tout ce que cela suppose de propension à une « généralisation », une « globalisation », une « confusion », à des « hésitations méthodologiques », mais aussi à une « volonté de démarcation » par rapport à d'autres domaines techniques de la construction, tout en utilisant et*

réinterprétant les apports de ces autres domaines notamment au plan théorique ou en s'appuyant sur l'interprétation des expériences développées par ailleurs, sur la conservation de l'architecture de pierre, par exemple. Ce n'est finalement que vers la fin des années 80, mais surtout au cours de la première moitié des années 90 qu'émerge petit à petit une pensée théorique et une méthodologie propre à la question de l'analyse pathologique des constructions en terre et du diagnostic. Les insuffisances actuelles qui demeurent et qui ont pu être relevées concernent la **prédominance du propos technique sur le propos « environnementaliste »**, avec néanmoins des tentatives récentes **d'étendre le diagnostic au delà du seul niveau technique en intégrant aussi des considérations d'ordre social, culturel et économique**. Des imprécisions demeurent qui concernent la méthodologie avec une simplification ou une « compression » des niveaux d'étude et d'analyse depuis l'observation des phénomènes à l'interprétation des causes et de leurs origines, mais davantage au plan scientifique en n'ayant pas encore bien établi les niveaux d'étude et d'analyse différenciés entre le « macro » et le « micro » pathologique. Une distinction qui d'ailleurs ne peut pas être aussi simpliste car l'objet est très complexe et car il y aurait sans doute à définir d'autres niveaux d'étude et d'analyse, avec leurs interfaces, entre le « macro » et le « micro ». Il nous semble en effet qu'il y a là matière à avancer pour mieux clarifier le propos théorique et scientifique et pour en favoriser les répercussions sur le plan pratique.

L'autre aspect qui mérite aussi d'être relevé, c'est **l'écart entre la pensée théorique et son « applicabilité » sur le terrain**. Car, au point actuel d'élaboration de la méthode d'analyse des pathologies et de définition du diagnostic, les chercheurs ont élaboré un outil de travail dont l'utilisation « rigoureuse » et « exhaustive » prend sans aucun doute beaucoup de temps et de mobilisations humaines, matérielles comme financières. Or, la réalité montre encore le plus souvent que le temps et les moyens peuvent manquer pour exploiter « à plein » cette pensée théorique et cette méthode, dans les faits. Les opérateurs sont en effet souvent confrontés à une certaine vélocité d'analyse et de prise de décision, à une pénurie de moyens, qui les conduisent à simplifier considérablement l'utilisation de l'outil théorique et méthodologique, dans le cadre de missions de « relevé des conditions » ou de « l'état » qui demeurent « préliminaires », à établir des fiches de diagnostic « simplifiées », à s'en tenir là et à proposer presque aussi immédiatement des interventions, le plus souvent urgentes car nécessaires pour garantir la préservation des biens menacés. Mais, au-delà des « évidences », le passage à une phase ultérieure plus complète d'analyse, d'évaluation et d'interprétation d'un plus large spectre d'hypothèses, de mesures et de « monitoring » ne s'opère pas aussi souvent qu'on pourrait le croire. Il y a donc lieu de s'interroger sur la définition de différents niveaux de simplicité et de complexité, de réduction et de rigueur, de « faisabilité » opérationnelle des outils théoriques et méthodologiques d'analyse-diagnostic, de façon à garantir, en fonction des contextes et des ressources, une qualité suffisante et « indispensable » de l'analyse à même de fonder l'efficacité des interventions sur un niveau de pertinence et de cohérence « absolument » nécessaire du diagnostic.

II.2. - L'importance de l'évaluation : quelle attitude adopter ? Quelle philosophie ?

*Peu d'auteurs ont essayé de prendre du recul sur cette question de l'analyse pathologique et du diagnostic des constructions en terre. Pour tenter de définir une attitude de pensée et d'engagement sur le terrain, pour essayer de dégager une « philosophie ». Dans le fonds documentaire disponible que nous avons traité, nous avons repéré deux contributions qui méritent d'être relevées. L'une de **R.E. Hughes**, en 1984, qui traduit l'importance devant être accordée à « l'évaluation » et pour divers niveaux de préoccupations, l'autre de **K. Van Balen** (1990) qui ouvre des voies insuffisamment explorées jusqu'alors.*

Dans une communication présentée lors du colloque international de Bruxelles (1984) « Les technologies de construction appropriées aux pays en développement », R.E. Hughes traite la question de la « réparation » et de « l'entretien » des constructions en terre. Il rappelle que du fait de la grande sensibilité du matériau terre, les édifices sont très exposés à un « effet domino ». Les problèmes non traités génèrent presque aussitôt de nouveaux problèmes, les causes de ces problèmes agissant souvent de façon sérielle. Ce propos sera plus évident pour la communauté scientifique dans les années 90 et nous y reviendrons par la suite. Pour Hughes, toute intervention sur une construction en terre ne peut être envisagée qu'après avoir réalisé une analyse poussée de l'état existant et antérieur du bâti. La première étape doit donc être celle d'un relevé global, et notamment des pathologies, qui doit prendre en compte les éléments suivants :

- 1 - l'environnement à l'échelle macro et micro ;
- 2 - les matériaux, également au niveau macro et micro ;
- 3 - la forme architecturale et l'histoire ;
- 4 - la technique de construction ;
- 5 - le système structural ;
- 6 - L'usage et les contre usages comme les changements futurs prévisibles.

Nous relevons là, au début des années 80, une position qui se démarque de celle se limitant aux aspects plutôt techniques de la question et valorisant clairement une démarche de caractère holistique où l'étude de l'environnement, comme de l'histoire du bâtiment, occupent une place importante.

R.E. Hughes relève qu'il n'existe pratiquement pas de guides pour les architectes ou les constructeurs qui voudraient développer une activité de conservation des bâtiments historiques ou de réparation des maisons « ordinaires », en terre. Hughes fonde son intervention sur une contribution antérieure, in « *Material and structural behaviour of soil construction walls* », *Monumentum*, Vol. 26, n°3, (1983), qui proposait une sorte de catalogue des dommages typiques, et où la composition des terres était décrite avec leurs propriétés mécaniques et chimiques. Un guide pratique qui énonçait un ensemble de problèmes matériels et structuraux à considérer à la lumière de la question de « l'entretien ». Il insistait alors sur le fait que la reconnaissance des problèmes et la définition de leurs mécanismes de causalité était la première étape pour préparer l'engagement d'un traitement visant à maîtriser ces problèmes matériels et structuraux. Pour Hughes, si les constructions en terre sont très sensibles à l'environnement c'est parce qu'elles ont été réalisées avec un matériau pris sur place dont on ne connaissait pas toujours les qualités et sans connaître ses usages antérieurs. C'est aussi parce qu'elles n'étaient pas

toujours bien conçues, et le plus souvent réalisées en application de pratiques de construction parfois mauvaises et empruntées à d'autres traditions de construction. Mais encore car elles n'intégraient pas du tout la préoccupation du détail d'ingénierie. Tous ces aspects étant conditionnés par « la mode », par des « traditions mal comprises », par la question du « coût », par d'autres priorités sociales, et par « l'ignorance » ou la mauvaise perception des influences de l'environnement. Ce propos est bien loin de reconnaître la valeur « intrinsèque » d'un « savoir-faire » des anciens. Ici, l'ingénieur veut comprendre, expliquer, et ne fait aucune concession à des « acquis » du passé ou à une forme de romantisme, de nostalgie d'un passé révolu qu'il faudrait retrouver pour continuer à bien construire et bien conserver. Pour « réapprendre » il vaut peut-être mieux être suspicieux à l'égard de la « culture » et s'ancrer sur des positions « rationnelles ».

Selon Hughes, les occupants des maisons de terre étaient conduits à adopter l'une ou l'autre de deux principales attitudes :

1 - Accepter de vivre dans les limites des possibilités physiques du matériau, en laissant la structure se dégrader continuellement, jusqu'au point où cela commençait à présenter des risques pour la vie et exigeait une intervention structurale lourde. Cette attitude conduisait alors à l'abandon de la demeure et à sa reconstruction, sur place, à côté ou ailleurs.

2 - Assurer un processus continu d'entretien, des réparations majeures, des additions et altérations, des changements de vocation spatiale. On est alors en présence de structures très complexes qui changent continuellement de forme et de caractère.

Chaque maison en terre doit être appréhendée comme un cas unique. La compréhension de ses propres performances et des causes des problèmes peut être plus longue que le traitement qui sera appliqué par la suite pour y remédier. Car les mauvaises actions pourront avoir des conséquences encore plus catastrophiques que de laisser le bâtiment tel quel. Ainsi, l'éventail des attitudes qu'un constructeur ou un conservateur pourra adopter se déclinera de la façon suivante :

1 - Une attitude d'intervention minimale. Mais celle-ci pourra ne pas être appropriée dans la mesure où même des actions simples de réparation peuvent introduire de sérieux problèmes par ailleurs.

2 - Dans chaque projet on intégrera un programme d'entretien qui débutera souvent durant la construction même de l'édifice, ou dès que le processus de conservation est engagé.

3 - La perspective d'un entretien complet, alors que le processus de dégradation est avancé, n'ira certainement pas dans le sens de la philosophie originale qui consiste à résoudre les problèmes immédiatement, dès qu'ils se posent, et non à résoudre tous les problèmes à la fois. Et, pour Hughes, beaucoup de dommages mineurs font aussi partie du charme de la structure (de son histoire). Souvent, les réparations antérieures ne rectifiaient en rien la ou les causes des problèmes et ne consistaient qu'à différer une action plus lourde (l'économie).

4 - L'emploi de techniques de construction ou d'entretien « originales » peut ne pas être approprié dans la mesure où les propriétés du matériau du site peuvent avoir considérablement changé au cours du temps. *Des matériaux nouveaux peuvent apporter des résultats tout à fait acceptables. Nous devons alors compléter en rappelant qu'il faut alors adopter le bon compromis garantissant un respect de l'authenticité et de l'intégrité des matériaux, des structures, de l'architecture. Particulièrement lorsqu'il s'agit d'édifices de valeur historique. Ce*

qui peut éventuellement être discuté pour les interventions sur un objet bâti vernaculaire de moindre « valeur patrimoniale » (conservation / vs / restauration-réhabilitation).

5 - Il est généralement impossible et techniquement non approprié de réutiliser les matériaux qui se sont dégradés car ils ont perdu leurs propriétés originelles. *Notons que c'est pourtant ce qu'ont fait des générations et générations de bâtisseurs comme l'attestent les recherches archéologiques, sur de nombreux sites.*

6 - Il est très difficile, voire souvent impossible, de démonter avec précision et de reconstruire un mur en briques de terre, particulièrement si l'on doit replacer chaque brique dans sa position originale. Par ailleurs, il n'existe pas de méthode économique et faisable au plan technique pour détruire et remonter un mur monolithique en terre (bauge, pisé). C'est effectivement un vrai problème.

7 - L'introduction d'agents stabilisants (ou consolidants), ou de terre stabilisée, dans les structures existantes, entraînera inévitablement un changement de texture de la surface des parois. Plus encore, ces techniques peuvent générer de nouveaux comportements et peuvent fortement contrarier les futures activités d'entretien.

8 - Des travaux de protection importants comme la construction d'abris et/ou de couvertures, de clôtures, peuvent affecter des micro facteurs environnementaux difficiles à observer. Ils peuvent ainsi souvent contribuer à une mauvaise maîtrise des efforts de conservation en générant d'autres processus de dégradation qui pouvaient ne pas avoir cours jusqu'alors.

R.E. Hughes insiste sur le fait que le succès des travaux de traitement repose fondamentalement sur la description précise et la bonne compréhension des processus générant une dégradation active et une déformation structurale. La réparation de l'évidence visible des dommages, sans avoir rectifié les mécanismes des causes n'aura pas plus de valeur qu'une action à court terme ou ne sera pas davantage qu'un masque cosmétique.

Il convient d'abord d'avoir une bonne connaissance des types de problèmes qui peuvent se présenter. De même lorsque l'on est en phase de collecte des données techniques nécessaires, faut-il pouvoir analyser ce qui se cache derrière l'évidence des problèmes. Pour cela, une série de tests peuvent être utilisés, pour les problèmes courants comme pour ceux qui seraient plus inhabituels. Ils fourniront des informations utiles pour définir les techniques de réparation les plus appropriées. L'auteur renvoie alors à un ensemble de tests et essais de terrain et de laboratoire qui ont été décrits dans notre premier chapitre, issus des normes BSI (Angleterre), ASTM (Etats-Unis) ou DIN (Allemagne). Reprenant une de ses contributions antérieures, (op. cit., 1983), R.E. Hughes présente tout un ensemble de tableaux et de fiches rendant compte des différents tests qu'il convient de réaliser sur le matériau ainsi que les études de type structural (déformations, fissures, ...). On aura remarqué notamment un tableau proposant 15 traits typiques pour pouvoir décrire finement les fissures.

D'autres éléments du propos de Hughes, sur la planification de l'entretien, sont reportés dans la troisième partie : « interventions, traitements, évaluation ».

Cette contribution de R.E. Hughes traduit bien l'expérience acquise par l'auteur dans le domaine de la « réparation » ou de la « restauration » des édifices en terre de nature « courante ». Cette expérience sera d'ailleurs mise par la suite au service d'une activité de consultant pour le bureau d'études britannique Ove Arup and Partners, dans d'autres pays, qui permettra à Hughes de continuer à développer sa réflexion en aboutissant à un propos de plus en plus concis et

dégageant des aspects essentiels de la question de la dégradation et de la conservation des architectures de terre. Mais pour l'époque de la contribution antérieure (1984) et pour ce qui est de la « conservation » d'un patrimoine archéologique ou de caractère « historique », il y aurait lieu de développer un propos plus spécifique. Celui-ci n'a d'ailleurs commencé à être vraiment développé qu'à partir de la fin des années 80 et au début des années 1990. Les cours « PAT » sur la préservation du patrimoine architectural en terre (ICCROM/CRATerre-EAG) réalisés en collaboration avec plusieurs experts internationaux développant une spécialité de cette approche allaient y contribuer ainsi que l'ensemble des manifestations internationales (conférences, colloques) organisées dans le cadre du projet « Gaia », avec plusieurs partenaires institutionnels, aux U.S.A. (Adobe'90, Las Cruces) et au Portugal (Terra'93, Silves).

La deuxième contribution que nous avons annoncée sur cette question de « l'attitude » ou de la « philosophie » à adopter, est justement à situer dans le cadre de la sixième conférence internationale sur la conservation de l'architecture de terre, « Adobe'90 », (Las Cruces, Nouveau Mexique, USA). L'exposé de K. Van Balen (Leuven, Belgique) entend présenter une méthodologie pour la conservation et la restauration des constructions en terre qui inclut les éléments suivants :

- l'étude de l'environnement physique ;
- l'étude des valeurs historiques ;
- l'état du bâtiment ;
- l'évaluation de la typologie architecturale ;
- la signification architecturale ;

Nous sommes un pas un peu plus avant, l'auteur abordant la question de « l'analyse de la valeur » de l'objet architectural à conserver, en tentant d'élever le propos au dessus des seules considérations d'ordre technique. Eu égard à la problématique de la conservation des architectures de terre, patrimoine encore alors assez dévalorisé, la position ménage une ouverture.

Pour l'auteur, la prise en compte des éléments précédemment cités doit être située dans une approche « cyclique », de façon à définir un équilibre entre les différents niveaux de valeur qui sont particulièrement importants pour définir l'intervention. Dans ce sens, le problème « technique » de la conservation des architectures de terre est inclu dans une « évaluation globale » et non traité à part. Car K. Van Balen soutient comme hypothèse de travail que « la lecture des différentes méthodologies proposées pour la conservation des constructions en terre montre que celles-ci se limitent en général à un point de départ où seul le problème technique de la conservation est abordé. Ceci mène en général à des solutions techniques qui perdent de vue le cadre architectural et social, tant pour l'évaluation des problèmes posés par la conservation que pour les interventions possibles ».

Le point de départ de la méthodologie proposée par K. Van Balen est donc que « chaque problème technique se trouve dans un vaste contexte qu'il faut analyser profondément ». Pour cela, une approche pas à pas est proposée qui distingue les phases suivantes :

- l'analyse ;
- le diagnostic ;
- la thérapie ;
- le contrôle.

Au moment où cette méthodologie est proposée, c'est à dire dans le cadre de la conférence internationale « Adobe'90 », la position se démarque très clairement des apports de réflexion antérieurs et remet en situation la question de la pathologie et du diagnostic dans une nouvelle perspective, celle de l'élaboration plus globale des « plans de conservation », niveau de réflexion précédant celui des « plans de gestion » qui s'affirmera au cours des années 90. Pour cette deuxième partie de notre révision littéraire on ne retiendra que deux aspects du propos de l'auteur, l'analyse et le diagnostic.

L'analyse

Selon l'auteur un édifice doit être analysé dans ses différentes dimensions car il s'agit d'un objet architectural qui reflète une « histoire ». L'analyse historique doit donc être développée. Il s'agit par ailleurs d'un « conglomérat » de matériaux dont le comportement doit être connu. L'architecture révèle aussi une « typologie » qui tient de l'histoire de l'architecture. L'architecture est aussi une « réponse » à différentes contraintes comme le climat, la présence de matières premières, une technologie acquise, des interventions ultérieures. L'architecture est elle-même porteuse d'une « signification » qui doit être comprise au regard de la société qui l'a créée. Autant de dimensions qui doivent être analysées, évaluées, confrontées dans le diagnostic, et qui permettront de définir les grandes lignes de l'intervention. Ainsi, sur proposition de l'auteur, l'analyse se déroulera suivant la séquence suivante :

- étude de l'environnement de l'objet architectural ;
- étude historique de l'objet ;
- étude des matériaux ;
- comportement mécanique des constructions ;
- étude de la typologie architecturale ;
- relations entre la typologie architecturale et les matériaux ;
- étude de la signification.

Le diagnostic

Le diagnostic est posé comme « la confrontation et la synthèse des résultats de l'analyse ». Mais K. Van Balen s'attache plutôt à exprimer plusieurs « dilemmes » auxquels le conservateur peut être confronté, sous forme de questions :

- faut-il « consolider » une ruine sans restaurer ces éléments typologiques qui, bien que n'existant plus, servaient par exemple à la protection des murs ?
- faut-il « reconstituer » des structures très dégradées et risquant l'effondrement, et comment alors garantir la pérennité de la valeur historique ?
- quel est le « degré de valeur » des éléments de composition architecturale qui doit être pris en compte pour décider du niveau d'intervention entre « préservation », « consolidation », « restauration », voire « reconstruction » ?
- la restauration n'est-elle qu'un nouveau travail d'entretien « cumulé » à des pratiques d'entretien antérieures qui ont pu cesser ?
- ne faut-il pas aussi avancer le concept de « conservation des savoir-faire traditionnels » pour mieux aborder la question de la conservation des bâtiments eux-mêmes ?

L'ensemble du propos est très ouvert mais demeure encore général, bien qu'il tente une ouverture sur une « globalisation » de la question de la conservation de l'architecture de terre, en intégrant la question de l'analyse et du diagnostic comme une « étape » dans l'ensemble de la séquence d'intervention

II.3. - Phénoménologie et principales causes des désordres

II.3.1. - Introduction à une phénoménologie générale

Rapporteur d'un thème de colloque sur la « Modernité de la construction en terre » s'étant tenue à l'ENTPE de Lyon, France, (1984), domaine couvrant alors les projets de construction en terre ou de réhabilitation réalisés en France, H. Guillaud fonde une première partie d'intervention de synthèse, à caractère généraliste, sur la question de l'analyse pathologique du bâti en pisé, préalable à toute action de restauration ou de réhabilitation. Il rappelle qu'une telle analyse induit nécessairement une connaissance du matériau terre, de la construction et de l'architecture en pisé, voulant en cela relever le fait que les approches et méthodes développées pour d'autres matériaux ne sont pas aussi directement transposables à la terre. Fondant son propos sur l'expérience de P. Scarato, architecte restaurateur de bâtiments anciens en pisé membre de la jeune association française « Pisé terre d'avenir », l'auteur relève que l'analyse pathologique du pisé fait ressortir principalement trois niveaux de désordres :

1 - Les désordres de surface sur le matériau avec principalement :

- . les microfissures de retrait ;*
- . les fissures de retrait des banchées ;*
- . l'érosion de surface due à la pluie, au ruissellement et au rejaillement ;*
- . l'éclatement dû au gel ;*
- . les décollements d'enduits.*

2 - Les désordres internes au mur, avec :

- . la pathologie d'humidité au pied du mur provoquant un creusement et pouvant causer à terme un effondrement du fait d'une perte de résistance en compression ;*
- . la pathologie d'humidité due à des restaurations négligentes, avec, par exemple : le relèvement des chaussées qui réduit la hauteur des soubassements, les pavements étanches qui bloquent l'évaporation, les enduits imperméables, l'absence de drainage périphérique.*

3 - Les désordres structurels, avec :

- . Les efforts de traction, flexion, cisaillement dans le mur, du fait de tassements différentiels au droit des fondations ;*
- . les fissurations en des points fragiles du fait d'une absence de chaînage ou de tableaux de baies mal conçus ou construits aux angles du bâtiment, aux liaisons de banchées, en haut des murs, aux allèges des fenêtres.*

On voit ici que le propos est encore imprécis, insuffisamment hiérarchisé, et qu'il mêle différents niveaux de considération entre les problèmes d'humidité, de structure, la question du diagnostic, assez mal appréhendée, du fait d'une confusion de niveau d'analyse entre les symptômes, les causes, les origines des causes. La problématique de la restauration des architectures de terre est alors toute naissante et les opérateurs cherchent à se positionner, à développer une réflexion spécifique, à définir des outils méthodologiques nouveaux.

II.3.2. - De la connaissance des facteurs de la durabilité

Dans son ouvrage intitulé « La conservation des bâtiments en argile et en craie » (*Conservation of clay and chalk buildings*), **Gordon T. Pearson**, U.K., (1992) développe un troisième chapitre sur les qualités des maçonneries en

terre. Il s'agit en fait d'une présentation des principales propriétés du matériau que nous avons révisée dans notre premier chapitre. Mais on aura relevé le développement d'un propos sur les facteurs affectant la durabilité qui mérite attention dans le cadre de cette évocation de la phénoménologie des désordres et des facteurs à prendre en compte pour une bonne analyse-diagnostic. Le propos se situe souvent à deux niveaux (phénoménologie et diagnostic) mais il nous a semblé plus approprié de le rapporter dans ce chapitre.

La durabilité constatée de nombreux édifices bâtis en terre, et datant de plusieurs siècles, confirme les bonnes qualités de résistance du matériau qui, selon G.T. Pearson, dépendent de plusieurs facteurs. En effet, pour qu'un édifice en terre puisse durer il faut :

- qu'il soit bien situé ;
- qu'il soit conçu en fonction de son usage ;
- qu'il soit bien construit avec de bons matériaux ;
- qu'il soit correctement protégé ;
- qu'il soit utilisé selon sa vocation d'usage ;
- qu'il soit entretenu régulièrement.

1 - La situation :

Il existe une relation entre la situation des bâtiments en terre et sa résistance. La durabilité dépend de plusieurs critères mais les bâtisseurs d'autrefois choisissaient leurs sites avec attention. La plus grande menace est l'eau. Ainsi, dans les régions humides, il est plutôt rare de trouver des bâtiments en terre. Un bon site est en général sec, bien drainé, et parfois surélevé. L'orientation donnée au bâti, est aussi essentielle de façon à ce que l'ensemble des façades puissent bénéficier d'un ensoleillement suffisant tout au long des saisons. En effet la différence d'absorption de chaleur entre une façade sud et une façade nord, est considérable. Ainsi on a pu remarquer dans la région du Hampshire que l'orientation privilégiée était plutôt l'est ou l'ouest. Car, plus la façade sud est longue, plus l'absorption de chaleur est importante et donc plus grand le risque d'expansion et de fissuration des murs. Les variations de température des murs sont importantes entre l'extérieur et l'intérieur. Ainsi, la façade extérieure est sujette à de fréquentes variations thermiques du fait de son exposition au vent, à la pluie et au soleil. La façade intérieure n'est sujette principalement qu'à l'influence des usagers (production de chaleur, vapeur). De même, la hauteur du mur joue un rôle car la base du mur est à la fois affectée par le risque d'humidité capillaire et par une exposition maximale au soleil, conditions qui ne sont pas réunies dans la partie haute du mur qui est ombragée par le débords de toiture. On a donc une variation de conductivité thermique entre le bas et le haut du mur. Mais, en général, si le bâtiment en terre peut bénéficier au maximum du soleil, c'est tout à son avantage. Enfin les autres critères liés à la situation des bâtiments en terre sont la disponibilité immédiate des matériaux de construction, pour des raisons d'économie (transport), et la bonne capacité portante du sol, car les murs en terre sont en général épais. Ainsi les bâtisseurs, même en limitant les ouvrages de fondations, recherchaient toujours le « bon sol » ou le « sol solide ».

2 - La conception :

La bonne résistance des murs est un principe de base garantissant la durabilité. Le but recherché est d'éviter la fissuration pouvant résulter d'un mouvement structural car le matériau terre a une faible capacité portante et résiste très mal en traction. Un bâtiment est conçu pour une vocation d'usage précise. Ainsi les murs d'un « cottage » n'étaient pas conçus pour porter de lourdes charpentes.

L'épaisseur des murs varie aussi selon la hauteur des murs et le nombre de planchers qu'il vont supporter. Le plan largement ouvert des granges exige une plus grande hauteur de murs et donc un chaînage dans leur partie haute. Pour les *cottages*, la stabilité des murs est principalement assurée par le liaisonnement des murs entre eux. Chaque pièce forme une structure cellulaire dépendante des pièces voisines pour supporter les planchers et assurer sa stabilité. Pour un bâtiment de deux niveaux, la distribution des charges mortes était prise en considération avec attention de façon à ce que les petits murs gouttereaux reprennent les chevrons de toiture sur une sablière haute en bois, alors que le plancher haut était supporté par les longs murs gouttereaux. Les poutres de plancher et plafond étaient soutenues par les murs de refend et les planchers eux-mêmes agissaient comme un diaphragme pour contreventer l'entièreté de la structure. De même les ouvertures doivent être de taille relativement modestes de façon à garantir une masse suffisante de murs porteurs. Les linteaux sont en général posés sur des longueurs d'appui plus importantes que dans la maçonnerie traditionnelle et l'on prévoyait à l'avance les modes de fixation des cadres de baies, de manière à ne pas percer les murs par la suite. Les arêtes des jambages étaient arrondies, de façon à limiter leur érosion. La mise en place du conduit de cheminée était aussi très importante. Son inclusion dans l'épaisseur d'un mur extérieur peut être à l'origine de fissurations. Aussi le conduit était-il placé au centre du bâtiment constituant un noyau central autour duquel pouvaient être construites les structures de planchers et de toiture contribuant au maintien de la structure. Ce conduit était en général construit en briques cuites et indépendant de la structure en terre crue.

3 - Les matériaux et la main d'œuvre :

Le choix attentionné des bons matériaux est très déterminant dans la durabilité des maisons en terre et peut-être plus déterminant que les facteurs précédemment évoqués. La granularité de la terre, avec une structure continue des graviers aux argiles, et le choix d'une bonne paille, étaient très importants. La qualité minéralogique des argiles, leur stabilité, était aussi recherchée de façon à limiter les risques d'expansion ou de gonflement et retrait des murs. Quand à la main d'œuvre, on veillait à son savoir-faire, notamment pour préparer le mélange de la terre avec l'eau et avec la paille, ainsi que lors de la mise en œuvre des murs, à la qualité du compactage et à la hauteur des couches de terre.

4 - La protection :

Une fois achevé, le bâtiment devait être protégé. Le but était de prévenir au maximum l'action de l'eau et de l'humidité sur les murs. Leur base nécessitait une assise, non pas tant pour se substituer aux fondations, mais pour garantir une protection contre l'eau et contre le risque d'érosion. Ce soubassement agissait aussi comme une barrière « respirante », entre le sol et les murs, de façon à ce que l'humidité capillaire puisse s'évaporer avant d'atteindre le niveau de la terre crue. De même le sol du rez-de-jardin était surélevé par rapport au terrain naturel et le matériau de ce sol était, lui aussi, « respirant », notamment de façon à ce que les sels nocifs ne passent pas dans les murs. En partie haute du mur, la dépassée de toiture protégeait les murs et empêchait ainsi qu'il puisse être humide, ou geler. Ces débords de toiture pouvaient être de 60 à 75 cm. Les murs étaient aussi protégés d'un enduit léger et respirant, pour que l'eau de toiture canalisée par des gouttières et descentes d'eau inexistantes, ne puisse les éroder. Cet enduit assurait aussi une protection contre l'action d'érosion cumulée du vent et de la pluie.

5 - Limitation d'usage :

Un bâtiment est conçu en fonction d'une vocation d'usage précise et pour assurer sa durabilité. Mais il doit être utilisé dans les limites de l'usage prévu. Dans le cas contraire, des contraintes non prévues peuvent être exercées sur le matériau que le bâtiment ne pourra que difficilement contenir. Ainsi, les standards actuels de la vie moderne, avec les transformations induites, sont-ils parfois inadaptés, et à l'origine de problèmes. C'est le cas lorsque l'on veut augmenter la surface de plancher en aménageant les combles par exemple. Cela ajoute des charges aux murs et ils peuvent alors fissurer, notamment à leurs angles. La tendance moderne à vouloir aussi agrandir les pièces en perçant ou cassant des murs, modifie l'équilibre initial du bâtiment et donc sa stabilité. Les bâtisseurs anciens s'assuraient d'une bonne liaison structurale entre tous les murs extérieurs et intérieurs. Ils prévoyaient aussi des chaînages en bois et parfois des clés de mur à mur. De même l'augmentation de la taille des ouvertures pour recevoir davantage de lumière contribue-t-elle à réduire la masse des murs et donc à les affaiblir. Dans le cas d'une extension du bâti avec d'autres techniques de construction, des contraintes peuvent être générées à la jonction des bâtiments, notamment lorsqu'il faut ménager de nouvelles ouvertures pour permettre le passage entre le bâtiment ancien et le nouveau. On observe aussi une tendance à convertir les fonctions d'usage des bâtiments avec tout ce que cela suppose de modification des charges et des contraintes exercées sur les murs. Cela est le cas lorsque l'on réaménage les espaces intérieurs ou lorsque l'on crée des nouvelles cloisons, des salles d'eau par exemple. Enfin, la modification des infrastructures environnantes (création de routes, par exemple) pour un habitat essentiellement rural, peut générer des vibrations qui ont pu être fatales pour beaucoup de bâtiment se trouvant du jour au lendemain en bordure d'une nouvelle route.

6 - L'entretien :

Le besoin d'entretien est commun à tous les types de bâtiment mais sans doute plus essentiel pour les bâtiments en terre. Ainsi l'absence d'entretien régulier résultera en travaux de réparation qui peuvent être plus difficiles à réaliser que dans une structure en maçonnerie traditionnelle. Dès lors que la protection est altérée, le mur de terre peut être exposé à un grand risque de dégradation. Ainsi, selon le vieil adage, « il vaut mieux prévenir que subir ». Une absence complète d'entretien fera retourner la maison de terre à sa terre d'origine.

II.3.3. - Du manque d'entretien et d'usage

Dans un petit article publié récemment, en 1997, Jim Saunders développe la question de la détérioration des constructions en terre, en Nouvelle Zélande. Au-delà des considérations d'ordre général sur les principaux facteurs connus que sont l'eau, la flore et la faune agissant sur un terrain d'humidité, on aura remarqué l'intérêt porté par l'auteur à la question du manque d'entretien et du manque d'usage. Ces aspects sont assez peu évoqués dans la littérature pour que l'on y revienne. Car, comme le souligne l'auteur, le manque d'entretien est bien sans doute « la cause majeure de détérioration ». Au cœur de cet entretien, la réfection périodique des enduits permet en effet de limiter les risques. Quant au manque d'usage c'est sans aucun doute pour l'auteur le fait d'un déficit de chauffage et de ventilation des bâtiments inoccupés, qui contribue à maintenir une ambiance d'humidité prolongée et qui peut contribuer à accélérer le processus de dégradation. Ainsi, Jim Saunders relève

l'importance de redonner à ces anciens bâtiments en terre une nouvelle vocation d'usage.

II.3.4. - Pathologies spécifiques de la bauge, de l'adobe et du pisé

Selon les contextes d'intervention et selon les cultures constructives de leurs patrimoines architecturaux en terre nationaux ou régionaux, plusieurs auteurs se sont attachés à étudier les formes spécifiques de pathologies de tel ou tel mode de construction. Nous avons révisé quelques unes de ces contributions qui rendent compte des pathologies de l'architecture en bauge (« cob »), en adobe ou en pisé. On verra dans les propos qui suivent, de nature généraliste et visant à éclairer les lecteurs par une simplification de l'exposé, que les auteurs ont du mal à distinguer clairement ce qui relève de la phénoménologie des désordres, de la symptomatologie et de l'interprétation des causes. Certes, un propos généraliste orienté vers l'explication des problèmes peut guider les opérateurs dans leurs investigations. Mais, sachant que tout projet de conservation présente un caractère « unique », comme nous le rappelait justement R.E. Hughes, il convient de rechercher les spécificités, au-delà des évidences générales. Tout conservateur qui opère un diagnostic doit être très vigilant sur ce point. De notre point de vue, la littérature gagnerait sans doute beaucoup en clarté et en utilité si elle permettait de mieux distinguer ce qui peut ressortir du « général » (phénomènes communs à toutes les constructions en terre), de ce qui ressort du « particulier ». Une approche plus fouillée de la phénoménologie des désordres s'impose, qui doit être distinguée de la symptomatologie, en abordant plusieurs entrées d'études parmi lesquelles, au strict plan technique et architectural, on relèvera : la typologie des matériaux et des techniques de construction, la typologie des structures, la typologie des architectures et le catalogue des détails constructifs et architecturaux. Bien sûr, cette approche devrait être chaque fois, située, contextualisée.

• Pathologie de la bauge

Dans le cadre de la manifestation « *Out of Earth II* », colloque national sur les constructions en terre organisé en U.K. (Plymouth), en 1995, par le « *Centre for Earthen Architecture* » de la « *Plymouth School of Architecture* », **Barry Honeysett** a fait une intervention sur la question des « défauts de structure et dégâts communs des constructions en bauge, leur diagnostic et leur réparation ». Nous retiendrons ici la première partie de cette intervention sur l'aspect des causes communes de dégradation. L'auteur distingue ainsi, les points suivants :

- 1 - le mouvement structural causé par des forces appliquées au mur à partir d'influences extérieures ;
- 2 - l'érosion et la perte de matériau du fait du climat et des actions de la faune ;
- 3 - les effets d'une humidité excessive dans la bauge.

- Causes fréquentes de dégâts

Le mouvement structural : des malfaçons dans la construction des toitures et des planchers peuvent induire des forces additionnelles sur les murs de bauge qui ne peuvent y résister. Ces forces peuvent conduire à des mouvements latéraux et à des fissures. Dès lors qu'il y a fissuration structurale, chaque panneau de mur entre les fissures se comporte comme un élément de structure séparé. Ces fissures apparaissent souvent dans les angles des bâtiments en

bauge. Elles sont souvent causées par le mouvement vers l'extérieur induit par la poussée de charpente. Mais ces fissures peuvent être aussi de l'époque de la construction et provenir davantage de problèmes de retrait du matériau selon l'importance de sa fraction argileuse. Ainsi, les mouvements ultérieurs profiteront de ces faiblesses initiales et pourront élargir ces fissures de retrait. La perte de continuité structurale affecte la stabilité globale du bâtiment. L'effet contrefort/lien des murs liés entre eux est important pour la stabilité de l'édifice. Ainsi, une fissuration importante aux angles les rend davantage exposés aux poussées extérieures telles que pression du vent, dilatation thermique, ou impact éventuel de charges accidentelles. Il faut donc rétablir la continuité entre les panneaux de murs fissurés en recréant un système de « boîte ».

Toitures : les murs des anciennes maisons en bauge présentent souvent un dévers de l'aplomb du mur vers l'extérieur. Soit du fait de mauvaises fondations ou même d'un mauvais soubassement, soit du fait des poussées horizontale exercées par la toiture. Il peut s'agir d'un défaut de conception de la charpente ou d'une dégradation de l'une de ses pièces maîtresses. Ou encore d'un défaut de liaisonnement des chevrons. Souvent les anciennes maisons en bauge ont des charpentes à chevrons et à entrails retroussés (en forme de « A »). Le moment de flexion des chevrons, selon leur section et selon la hauteur de l'entrait retroussé, peut induire des poussées sur le mur et les amener à se déverser vers l'extérieur. Mais les murs de bauge, eux-mêmes, peuvent subir une rotation à certains niveaux correspondant à des joints entre les couches de bauge ou lorsque la hauteur du mur a été augmentée. Des transformations historiques, comme la création ultérieure d'une cheminée, peuvent aussi avoir contribué à rompre l'équilibre de la stabilité originelle.

Soubassements : la plupart des bâtiments en bauge sont bâtis sur des soubassements en pierre. La qualité de ces ouvrages dépend de la qualité de la pierre localement utilisée. Ils peuvent être aussi construits avec des parements appareillés et un bourrage de matériaux, terre et cailloux, dans leur âme. De plus, la qualité des mortiers pour la construction des soubassements est très variable selon les matériaux locaux disponibles (sable, chaux). Ainsi, les soubassements en pierres hourdés à la terre, pour les maisons les plus pauvres, sont très fragiles. Ces maçonneries de blocage peuvent aussi contribuer à exercer des pressions sur les parements appareillés qui présentent alors des ventres partiels et sont moins résistants pour supporter les murs de bauge.

Fondations : dans les bâtiments anciens, les fondations sont la plupart du temps réduites au minimum. Les soubassements étaient souvent, dressés à même le sol après avoir décapé la terre végétale pour faire une simple tranchée de surface. Mais selon la qualité du sol, sa quantité d'argile, les mouvements du sol induits par les variations d'humidité, sont variables. Les sols plus argileux gonflent, se rétrécissent, bougent. Par ailleurs, ces murs de bauge, souvent mal fondés, peuvent être affectés par la présence d'un drainage trop près du mur.

- Erosion

Le climat : les actions de la pluie et du gel sur les murs extérieurs conduisent inévitablement à une érosion de surface. C'est notamment le cas pour les murs exposés au sud où le soleil provoque un dégel de l'eau gelée contenue dans l'épaisseur des murs. Cela exerce des pressions, gonflements et érosions partielles de la surface. Ainsi, les murs nord souffrent moins et sont d'ailleurs moins souvent enduits. Au fil du temps, ces problèmes peuvent conduire à une perte suffisamment importante de matériau sur les façades extérieures et exiger

une reconstruction. Ainsi, souvent, on peut observer des réparations ou des consolidations structurales réalisées en briques cuites pour boucher des cavités. Mais la liaison structurale des matériaux, entre les briques cuites et la bauge, n'est pas toujours assurée. Alors, avec des mouvements différentiels causés par l'humidité et le séchage, les matériaux peuvent se désolidariser.

Flore et faune : la bauge est exposée à des ennemis « biologiques ». La flore peut coloniser les murs et causer de gros dégâts à cause des racines (le lierre par exemple). Les rats, souris et autres mulots nichent souvent dans les murs de bauge. Ils y creusent des cavités, des tunnels et profitent des fissures existantes pour les élargir en les incorporant dans leur réseau de circulation. C'est souvent le cas pour les bâtiments de grange plus que d'habitation, où ces rongeurs trouvent aussi leur nourriture. Bien que les dégâts occasionnés par les rongeurs soient rarement à l'origine d'effondrement ils peuvent contribuer à un affaiblissement de la résistance structurale des murs.

- Effets d'une humidité excessive

L'humidité est sans aucun doute la cause la plus commune d'effondrement des bâtiments en bauge. La base des murs en bauge, juste au dessus du soubassement en pierre est la partie la plus exposée à ce risque et la plus vulnérable. Les remontées capillaires, ajoutées de la pluie qui s'infiltre dans les fissures de l'enduit peuvent amener le matériau à un tel état d'humidité qu'il perd alors sa résistance et peut s'effondrer. Autrefois, les maisons en bauge étaient rarement enduites et lorsqu'elles l'étaient c'était avec des badigeons ou des enduits de terre ou de chaux. Ces matériaux sont perméables et permettent aux murs de respirer. Aussi, les pratiques modernes qui utilisent des enduits surdosés en liant hydraulique, et souvent à base de ciment, rendent les murs imperméables. L'humidité qui peut remonter dans les murs ou même la vapeur qui les traverse et atteint son point de rosée à une certaine température, sont piégées et causent alors des dégâts irréversibles. De même pour l'eau de pluie qui s'infiltrent par les fissures de ces enduits trop riches qui ont tendance à craquer. On peut alors avoir des effondrement soudains, imprévus. Il est donc parfois sain de supprimer de tels enduits au ciment pour sauver le bâtiment.

• Pathologie de l'adobe

Décrivant la pathologie de l'adobe, **Michel Tharan** (Colloque E.N.T.P.E., 1987, déjà référencé), commence son exposé en rappelant les principaux problèmes de nature « structurelle », à savoir :

- l'inexistence de fondations dans la plupart des bâtiments traditionnels en terre et donc le risque d'exposition des structures à des tassements différentiels du sol selon l'homogénéité de sa stabilité ;
- le rôle des soubassements qui se substitue à celui des fondations pour la transmission des charges et des efforts de la charpente et des murs. Alors que leur principale fonction est de protéger la base des murs contre le ruissellement et le rejaillissement des eaux de pluie ;
- les murs dont la résistance aux charges et aux efforts est plus ou moins bonne, selon la qualité d'exécution. Et l'on sait bien que ceux-ci résistent essentiellement aux efforts en compression et très mal aux efforts en traction ;
- les angles des murs, qui sont des points sensibles. Notamment pour reprendre des efforts divergeants de la charpente et des poussées vers l'extérieur, selon la plus ou moins bonne conception de la charpente ;
- les points d'appui des pièces de charpente qui peuvent créer des poussées ou des poinçonnements localisés ;

- les murs de refend qui reprennent principalement les charges de planchers. Ils les répartissent plus ou moins bien selon que le constructeur a ou non prévu des dispositions de répartition de ces charges, principalement à l'aide de bois noyés dans l'épaisseur et faisant office de chaînages.
- les couvertures qui ne protègent en général le haut des murs que par une poussée des chevrons au-delà de l'arase. Selon l'importance de la dépassée de toiture, elles sont plus ou moins efficaces.

Michel Tharan décrit ensuite les principales pathologies classiques en distinguant trois niveaux : la structure du bâti (ou pathologie structurale), l'humidité et les enduits qu'il traite à part.

1 - Sur la structure, Michel Tharan relève principalement la question du manque de chaînages verticaux et horizontaux à l'origine d'une désolidarisation des angles de murs. Notamment lorsque ceux-ci sont construits avec des matériaux autres que la terre crue seule, à savoir, briques cuites ou pierres. Quant à l'absence de chaînages horizontaux, elle est à l'origine d'une fissuration structurale verticale, notamment au niveau des angles et des linteaux. L'absence de fondations est également relevée comme l'un des principaux facteurs de pathologie structurale notamment en cas de tassement de terrain.

2 - Sur l'humidité, Tharan relève globalement deux types d'origine des manifestations d'humidité :

- l'eau en provenance du sol du fait de la nappe phréatique, ou d'infiltrations superficielles ;
- l'eau de pluie qui agit directement par infiltration, par rejaillissement sur la base des murs, accidentellement lorsque la toiture n'est pas entretenue.

3 - Sur les enduits, l'auteur précise que leur dégradation est principalement causée par :

- les mouvements du support : tassement du sol, matériaux de construction différents (sur les pans de bois p.e.), charges ponctuelles trop importantes, chocs thermiques ;
- les défauts d'adhérence, décollement et cloquage principalement dus à un mauvais dosage de l'enduit, une mauvaise préparation du support, une mauvaise exécution, un manque d'entretien ;
- des désordres dus à l'humidité avec des causes connues : remontées capillaires, rejaillissement, systèmes de récupération et d'évacuation des eaux pluviales détériorés.

*L'association **Cornerstones Community Partnerships** (Nouveau Mexique, USA) a publié en 1998 un guide sur la conservation de l'architecture en adobe, suivant un document préparatoire publié en 1996. Ce document a retenu notre attention pour sa forme très didactique rendant compte d'une expérience de terrain en des formes très visuelles par l'utilisation du dessin et de la photographie. Mais également pour l'aspect de la phénoménologie des principaux processus de dégradation de l'architecture en adobe, exposés par A. Crosby, qui a participé à cette publication. Les auteurs distinguent trois principaux processus de dégradation liés aux actions de l'eau et de l'humidité qui agissent :*

- 1 - par le cycle de mouillage/séchage, en trois phases : saturation du mur par la pluie, évaporation et migration des sels solubles en surface extérieure, cristallisation de ces sels entraînant une érosion de surface ;
- 2 - par le cycle de gel-dégel agissant également en trois phases : saturation du mur par les précipitations hivernales (pluies, neige), refroidissement de la

température et gel de l'humidité accumulée générant une cristallisation de l'eau et une expansion ;

- 3 - par les remontées capillaires et le rejaillissement en base du mur qui génèrent une dégradation par érosion. Cette dégradation pouvant être accélérée et se déplacer vers le haut du mur dans le cas où les réparations sont effectuées avec du ciment Portland (rebouchage ou enduit) ;

Sur l'aspect dégradation structurale, A. Crosby distingue deux phénomènes courants :

- d'une part, les mouvements possibles des fondations en pierres, souvent élémentaires, sous l'effet de l'élévation des contraintes internes exercées dans le mur ;

- d'autre part, l'effet de glissement vers l'extérieur des fondations en pierres, par exemple aux angles du bâtiment, sous l'effet de l'humidité qui diminue la résistance mécanique du mur. La transmission verticale des charges agit horizontalement à la base et plus l'état humide est accusé, plus le risque de glissement des fondations en pierres vers l'extérieur est accru.

A. Crosby conclut son exposé sur la phénoménologie des désordres typiques des constructions en adobe en rappelant que les parties des édifices les plus exposées sont le haut et la base de la paroi. La base des murs souffre notamment des problèmes d'humidité et notamment du rejaillissement des eaux de pluies depuis les gargouilles des terrasses plates ou depuis les égouts des toitures en pente. Ces bases de mur souffrent aussi d'une érosion pouvant être due à la nidation de petits rongeurs qui creusent des trous et galeries, érosion notoirement accusée en présence d'humidité. Quant aux toitures terrasses, l'action cumulée de la pluie et du vent est très fréquente, notamment sur les acrotères qui s'érodent.

• **Pathologie du pisé**

Dans un document du CRATerre, réalisé avec la collaboration du **GAITerre**, Groupement des Architectes et Ingénieurs Terre de Marrakech, Maroc (1983), destiné à fournir une aide à la conception architecturale de projets construits en terre dans le cadre d'un programme de coopération entre la France et le Maroc (REXCOOP), les auteurs dévoluent un chapitre à la question des « dégradations typées » de l'architecture en pisé. La réflexion proposée est directement issue d'une enquête de terrain menée sur les habitats des oasis du sud du pays (vallées du Drâa et du Dadès). Présentant les actions les plus typées de l'eau et de l'humidité, les auteurs décrivent un « système de la goutte d'eau » qui agit par impact, ruissellement, absorption, infiltration et rejaillissement. Quant à l'action plus pernicieuse de l'humidité, les auteurs distinguent la condensation, les remontées capillaires, les parasites végétaux. Puis, l'action du vent et ses principes d'action, notamment augmentés sur un terrain de pathologie d'humidité. Enfin, les actions des êtres vivants, hommes et animaux, souvent à l'origine d'une érosion de surface des murs (chocs, grattage, etc.). Mais les auteurs s'attachent particulièrement à relever les points fragiles des constructions en terre en distinguant deux parties les plus exposées des édifices, la « base » du mur et le « haut » du mur, auxquelles ils rajoutent quelques autres points faibles localisés comme les tableaux d'ouvertures, les acrotères, les gargouilles. Les causes des pathologies et leurs effets sont ensuite présentés sous la forme d'un ensemble d'illustration didactiques, pour les actions de l'eau (système de la goutte d'eau précédemment désigné), pour l'activité humaine et les actions d'autres êtres vivants, pour les actions du vent, cela pour la base des murs en pisé, d'une part, et pour le haut des murs en

pisé, d'autre part. De nombreuses photographies viennent témoigner des phénomènes pathologiques typiquement observables sur le patrimoine architectural marocain en pisé. De cette étude, les auteurs tirent un schéma théorique pour une « bonne conception architecturale » qui traduit le savoir-faire des bâtisseurs traditionnels pour garantir une protection de la base des murs, des murs courants eux-mêmes, des tableaux de baies, et une protection du haut des murs. Il convient de garder la mémoire des cultures constructives portées à leur épanouissement, au fil du temps. Ce document vaut la peine d'être revisité.

Dans leur ouvrage « Le pisé, patrimoine, restauration, technique d'avenir » (1986) les architectes français **J. Jeannet, G. Pollet et P. Scarato**, de l'association **Pisé terre d'avenir**, abordent la question de la restauration-réhabilitation des bâtiments anciens en pisé. Ils y consacrent un chapitre dont partie est réservée au problème de la pathologie et du diagnostic. D'entrée, les auteurs déclarent que la pathologie de la construction en pisé demande une approche complètement différente de celle rencontrée en construction neuve. Paradoxalement, à un matériau réputé fragile qu'est le pisé, correspond un bâti qui résiste avec succès aux agressions du climat. Le diagnostic des causes des désordres « ne s'arrête pas aux simples caractéristiques du matériau mais doit prendre en compte la conception, la construction, l'usage ». De plus certains désordres du bâti peuvent être anciens et avoir été stabilisés dans le temps. Il n'est donc pas si aisé de diagnostiquer les causes des problèmes de structure. Ces réserves nous semblent importantes à relever.

Les auteurs évoquent ensuite les problèmes d'eau et d'humidité. Bien que compacté et ayant une structure granulaire densifiée, le pisé reste sujet au risque d'eau du fait de sa fraction argileuse qui peut absorber l'eau et gonfler. L'érosion hydrique (pluie, projections) est la première cause de désordre. Les auteurs listent ensuite les nombreux cas de figure qui peuvent exposer le pisé à l'action de l'eau. Mais il relèvent toute l'importance de la bonne granularité de la terre, étalée, et d'un bon compactage du matériau pour réduire les effets de l'exposition à l'eau en améliorant notamment la résistance à l'érosion. L'humidité agit sous une forme plus cachée, et à l'intérieur des murs, car le pisé est hydrophile et peut perdre sa résistance mécanique si la présence d'humidité à la base des murs ou dans leur épaisseur est persistante. L'eau capillaire se déplace vers les zones sèches et s'évapore rapidement en surface. Aussi, l'existence d'un soubassement est-elle une disposition de protection essentielle pour protéger la base des murs, permettre à l'humidité de s'évaporer avant qu'elle n'atteigne le pisé. Les auteurs remarquent alors que tout changement dans cette logique qui rompt un équilibre originel, entraîne inévitablement des dégradations. Ils observent notamment que la logique des constructions neuves n'est pas du tout adaptée au pisé, particulièrement pour ce qui est de la réalisation d'enduits étanches qui contribuent à une élévation des remontées capillaires dans le mur et à un blocage de l'humidité dans les murs sans que l'on puisse observer le risque encouru. Des travaux d'environnement sont aussi des vecteurs de pathologie tels que remblaiement ou modification des pentes du terrain naturel, comblement de cave, bouchage de soupiriaux de ventilation. Mais ce sont aussi les sels solubles transportés par les remontées capillaires qui se manifestent par des taches brunâtres ou blanchâtres qui sont à l'origine d'une dégradation du pisé, en surface comme en épaisseur.

Sur la question des problèmes de structure, J. Jeannet, G. Pollet et P. Scarato, distinguent plusieurs niveaux. Tout d'abord, celui du matériau lui-même en rappelant que le pisé est compacté à l'état humide et que suivant le plus ou moins bon contrôle d'une teneur en eau optimale, le matériau peut être soumis

à des retraits et donc des fissurations. Puis au niveau du mur comme élément essentiel de la structure, le matériau ne travaillant bien qu'en compression et n'offrant qu'une très faible résistance à la traction. C'est ainsi que la reprise de tels efforts nécessite des dispositions constructives employant d'autres matériaux (linteaux en bois, arcs en briques cuites, profilés en acier pour des linteaux de conception plus récente). Tout dépassement de contrainte engage un processus de fissuration. Mais la cause principale des problèmes de structure est le tassement différentiel entre le sol et le bâtiment, suivant la capacité du sol à reprendre les lourdes charges des murs, capacité qui peut varier selon les saisons avec les problèmes de pluie, de gel, de sécheresse. De tels tassements peuvent aussi être générés par de mauvais drainages mais encore par la présence de grandes ouvertures dont les linteaux et les jambages sont insuffisamment renforcés. D'autres points faibles existent au voisinage des ouvertures, dans les angles et à la liaison de différents matériaux. Les fissures, lors de tassements peuvent alors apparaître dans ces endroits les plus vulnérables. Les angles du bâtiment sont aussi un élément de structure fragile car ils subissent des tensions perpendiculaires provenant de poussées ou de glissements (dans le cas d'un tassement). Alors, les constructeurs prenaient soin de renforcer ces angles par des sections de bois noyées dans la masse des angles, ou par la construction de chaînes d'angles en matériaux plus « nobles » tels que pierre ou brique cuite, ou même récemment en béton. Les toitures exercent des charges qui résultent en poussées transversales et selon la qualité de conception et d'exécution des charpentes, on peut observer des poinçonnement localisés et des fissurations. Cela est d'autant plus possible que le bâtisseur n'aura pas prévu une pièce de répartition des charges de toiture en couronnement du mur (généralement en bois). Ces mêmes poussées de charpente peuvent pour des longs murs provoquer des flambement et déformer le mur vers l'extérieur alors que les tassements peuvent contribuer à infléchir le mur vers l'intérieur, en creux.

Le propos exposé par les architectes de « Pisé Terre d'Avenir », dans leur ouvrage, est globalement correct. Mais la méthodologie de l'exposé demeure encore confuse, avec un mélange des niveaux d'observation-description des manifestations de la pathologie, d'explicitation des causes qui précède celui des manifestations, avec un propos analytique très sommaire ne développant pas vraiment la question propre du diagnostic, et surtout avec une évocation des traitements qui est exposée par anticipation. Nous sommes bien au cours des années 80 qui traduisent cette difficulté des opérateurs, même « spécialisés » à tenir un propos méthodologique clair sur cette question de la pathologie et du diagnostic.

II.4. - Diagnostiquer l'environnement du bâti

La question de la prise en compte de l'environnement du bâti, lors de l'étude des pathologies et du diagnostic, s'est peu à peu affirmée comme une phase préalable et simultanée à l'étude des matériaux et du bâti. Nous avons précédemment cité R.E. Hughes puis K. Van Balen, qui en faisait état mais qui ne donnaient pas encore au propos sur le « diagnostic de l'environnement » sa pleine spécificité.

Dans le cadre du colloque réalisé à l'E.N.T.P.E. (Lyon, France) en 1987, une communication de **P. Delcambre** (1987) de l'Agence Nationale (Française) pour l'Amélioration de l'Habitat, ANAH, relève l'importance de la démarche de diagnostic de l'environnement. C'est à dire de la connaissance du milieu

extérieur et de son action sur le bâti. Il propose en effet que la notion de diagnostic qui est alors admise pour l'habitat et qui focalise son intérêt sur le système constructif du bâti ainsi que sur l'état des ouvrages (vétusté, désordres), soit étendue à l'environnement. Il lui semble en effet que c'est un point primordial pour ce qu'il désigne comme « un système ouvert », comme l'est l'art de bâtir ancien, que de prendre en compte les influences du milieu naturel et particulièrement :

- les conditions d'équilibre hydrique et chimique par les échanges ;
- la nature des agressions ;
- les modifications du milieu extérieur et ses conséquences ;
- la permanence des sources locales d'approvisionnement des matériaux.

Mais aussi, jusqu'à l'appauvrissement du milieu social qui est facteur de désordre du fait qu'il entraîne un mauvais entretien du bâti. Ainsi, cette reconnaissance de l'environnement s'établira à différents niveaux, selon l'incidence plus ou moins directe des facteurs environnementaux sur les constructions, c'est à dire au plan « régional », en recherchant des informations de base pour une « généralité d'habitat », ou au plan « local », dans l'appréhension des modifications survenues au cours du temps. Et enfin, dans le milieu proche de l'édifice en déterminant « les échanges actifs ».

La nature des renseignements recherchés concerne l'ensemble des contraintes extérieures qui peuvent s'exercer sur le bâti et altérer sa capacité à remplir l'une de ses fonctions, à savoir :

- la stabilité, solidité, durabilité ;
- les défenses et protections, à la fois du gros œuvre et des occupants ;
- les services, les équipements et le confort.

Ces renseignements sont alors classés par « type de milieu » :

- le « milieu physique », données physiques naturelles du site (topographie, sol, eau, climat) ainsi que les modifications qui ont pu y être apportées (barrages, canaux, terrassements) ;
- le « milieu technique » du bâti environnant avec les caractéristiques des bâtiments voisins, des bâtiments de même époque ou de même construction, les caractéristiques des équipements desservant le site et des infrastructures pouvant avoir une répercussion agressive (route, voie ferrée, usine, etc.).
- le « milieu économique », c'est à dire la connaissance des conditions dans lesquelles le bâtiment a été construit (époque de « pénurie » en matériaux, région « pauvre »), comment il a vécu, son entretien, les modifications d'incidence économique (possibilités financières des occupants, changements de fonction économique).
- le « milieu social » avec la nature de l'occupation des locaux, la catégorie sociale des occupants, la nature de l'utilisation des locaux au cours des âges.

P. Delcambre fournit ensuite des éléments de méthode de travail pour mener cette « enquête d'environnement » en évoquant les procédures suivantes :

- la consultation des documents locaux existants, archives locales publiques et privées ;
- l'enquête directe auprès d'organismes ou de personnes et notamment auprès de la population de voisinage du bâtiment ;
- l'examen *in situ* de l'environnement immédiat et éloigné qui permettra un contrôle des renseignements recueillis par consultation documentaire et enquête. Qui fournira peut-être une meilleure compréhension de ces renseignements. Qui permettra de préciser d'autres investigations à effectuer.
- Les investigations qui consistent à effectuer certains travaux de sondages, ou de « découvertes » pour obtenir des renseignements complémentaires ou vérifier ceux déjà rassemblés.

L'auteur relève l'importance d'une bonne coordination dans la réalisation de ces opérations de recherche de renseignements sur l'environnement et propose que le responsable en soit celui qui est chargé de « l'ensemble » du diagnostic. Certains travaux de recherche ou d'investigation peuvent néanmoins être délégués à des opérateurs spécialisés.

L'influence des différents éléments et renseignements issus du « milieu » doit être ensuite examinée pour chacune des principales fonctions du bâtiment précédemment relevées par P. Delcambre :

- la stabilité, solidité, durabilité ;
- les défenses et protections, à la fois du gros œuvre et des occupants ;
- les services, les équipements et le confort.

L'auteur fournit ensuite des éléments de méthodologie en présentant des exemples de « grilles de diagnostic », l'une concernant la topographie du milieu physique, l'autre concernant les caractéristiques des équipements du site et du milieu technique. Ces grilles sont clairement identifiées par « milieux distincts » (physique, technique, économique et social), et mettent en relation d'une part les « renseignements » c'est à dire, ceux à recueillir, ceux recueillis et des observations, pour différents niveaux de repérage (région, local, quartier, sous-quartier), et d'autre part les « sources » (cartes photographies, plans, relevés, livres, etc.).

La méthode est assez intéressante mais elle aurait sans doute mérité à être explicitée quant à une « grille d'interprétation » fondée sur une « lecture combinatoire » des renseignements recueillis.

Todd R. Metzger, Larry Nordby et Jim Trott, spécialistes de la préservation du « *National Park Service* » ont publié un rapport d'évaluation du site de Pueblo Grande (Phoenix, Arizona), en 1988, qui a retenu notre attention pour sa grande clarté d'exposé et pour la méthodologie de relevé de l'état des pathologies et de « monitoring » de ces mêmes pathologies. Mais, plus en amont, dans le cadre de ce chapitre, c'est surtout l'intérêt porté aux facteurs de l'environnement physique et climatique, qui nous semble intéressant de relever. En effet, les auteurs parlent de « forces d'érosion » en présence sur le site qui seraient à l'origine de dégradations sévères. Ils relèvent aussi l'importance du fait que le site ait été laissé relativement à l'abandon après la période des fouilles archéologiques. Les fouilles archéologiques, par nature, sont elles-mêmes très destructives. Beaucoup de sites en terre démontrent tous les jours les dégâts causés par les recherches archéologiques, même si, au-delà de cette période mais hélas avec un trop long délai, un entretien de base ou des protections (toitures), ont pu être réalisés. Hélas trop rarement bien que cette problématique de la préservation commence à être mieux intégrée par le milieu archéologique.

Revenant sur les facteurs de dégradation environnementaux ayant agi sur le site de Pueblo Grande, cités par les auteurs, nous relevons : les vibrations soniques du passage des avions et des trains, la pollution atmosphérique, la présence d'une nappe phréatique de niveau élevé, l'insolation (expansion et contraction thermique), l'impact direct des précipitations, du vent, de la végétation, l'activité des rongeurs et des insectes, les activités intentionnelles ou non intentionnelles des visiteurs et enfin, la nature globale intrinsèque de la ressource elle-même.

Généralement, les effets des vibrations soniques sont mal connus. Cependant, une observation de base, durant le projet a permis de vérifier le fait qu'elles sont

à l'origine de vibrations du terrain à la fois durant le décollage des avions et lors du passage des trains. Nous nous souvenons avoir expertisé une maison en pisé dans le Dauphiné (France) qui s'était écroulée après le passage d'un avion de chasse supersonique. De même, Phoenix est une ville qui présente un taux de pollution atmosphérique élevé. Or des études menées sur le site de Mesa Verde, ont confirmé de façon substantielle que les composants polluants de l'air contribuent à une détérioration chimique et physique des pierres et des mortiers. Là encore l'importance d'un tel dommage est encore très mal connue.

Egalement, la présence, à proximité du site d'un canal d'irrigation historique qui pourrait contribuer, potentiellement, à élévation du niveau de la nappe phréatique. Ces mouvements de la nappe ont pu avoir des impacts directs sur des dégâts de structure. *Nous avons récemment observé le même phénomène sur un site gallo-romain proche du canal du Midi, à Sallèles-d'Aude, France.*

L'insolation ou les coefficients différentiels de température sont un facteur actif de dégradation et de désintégration des matériaux des murs. Le régime de température souvent extrême de la région de Phoenix contribue beaucoup à ce processus.

Les pluies sont sans doute le facteur le plus actif causant la détérioration des matériaux. Il en résulte notamment une abrasion de surface. L'eau peut aussi agir de façon combinée avec d'autres facteurs de dégradation et ne joue alors qu'un rôle catalyseur. C'est le cas du transport des sels solubles très destructeur dans l'âme des murs ou à leur base où ils contribuent également à encourager la croissance des végétaux. Mais l'eau, en contact avec le matériau, pourra résulter en détérioration, désintégration et à terme en effondrement des murs.

Le vent peut aussi être à l'origine d'un effondrement des murs, particulièrement pour les vestiges en situation de stabilité libre et élancés. De fortes tourmentes ou coups de vent peuvent déstabiliser ces structures mais plus communément, peuvent contribuer à une abrasion de la surface des matériaux.

Les insectes et les rongeurs, ou d'autres petits animaux sont très destructeurs. Le creusement, l'affouillement peuvent éventuellement conduire à des effondrements. C'est un potentiel qui ne doit pas être négligé.

La végétation a également un effet négatif en contribuant à détériorer les murs par abrasion de surface. Des branches d'arbre au voisinage des vestiges, peuvent frapper les murs. Des racines de grosses plantes peuvent aussi avoir un impact sur les matériaux du mur, à partir du sous sol (soulèvements).

Les impacts d'activités intentionnelles ou non intentionnelles des visiteurs peuvent aussi avoir un effet négatif sur la stabilité du site. Les mur frappés ou grattés intentionnellement par exemple. Les effets de la fréquence du trafic des visiteurs lorsque ceux-ci grimpent ou s'assoient sur les vestiges, contribuant à l'érosion des matériaux et même à des destructions partielles. Le passage de bétail peut être aussi un facteur de dégradation.

Quant aux matériaux utilisés par les constructeurs d'origine et selon la manière dont ils ont été bâtis, ce sont encore des facteurs qui peuvent être très influents. C'est lorsque les cycles d'entretien sont discontinus que la dégradation du matériau peut survenir. Mais encore la façon dont les archéologues traitent l'architecture. Si un site enterré est excavé et laissé à l'exposition des éléments, les effets du climat naturel pourront ruiner les vestiges découverts en peu de

temps. Cela est néanmoins dépendant de la nature du site et du climat ainsi que de l'importance des fouilles comme d'autres facteurs intrinsèques (matériau, structure) et/ou extrinsèques (social, culturel, économique).

Dans un article publié en 1996, rendant compte du projet de conservation du « *Castillo Tomabal* », au Pérou (pyramide de culture Virú), **Ana Maria Hoyle, José Carcelén et Federico Saavedra**, présentent succinctement un diagnostic de l'état de conservation de l'édifice en distinguant les causes externes des causes internes. C'est une approche méthodologique développée par d'autres auteurs qui distinguent les causes « extrinsèques » des causes « intrinsèques ». Mais, dans la présentation des causes externes, on relève alors des données qui relèvent davantage du macro-environnement, avec notamment des causes d'ordre social et climatique. Les auteurs relèvent notamment le saccage de la pyramide par les chercheurs de trésors clandestins (*Huaqueros*) qui ont creusé des puits sur toute la hauteur de l'édifice en ayant dégagé un équivalent de volume de matériau 5 000 m³. Ces puits ont non seulement affaibli la structure mais ont également favorisé l'intrusion de l'eau des pluies qui ont activé le processus de dégradation. Quant au deuxième aspect, celui du climat, c'est bien sûr l'effet des pluies cycliques dues au phénomène du « *Niño* » qui a contribué à affecter l'édifice depuis des centaines d'années en causant des effondrements importants. Les auteurs relèvent également les effets d'un projet d'irrigation dans le voisinage du monument qui prévoyait le creusement d'un tunnel et d'un siphon à environ 300 m de distance. Pour donner des recommandations à l'entreprise, de façon à ce que leurs travaux n'affectent pas les édifices patrimoniaux de la région, l'Institut Géophysique du Pérou a entrepris de réaliser des expérimentations visant à analyser l'effet des ondes sismiques sur les structures. Pour cela, six explosions doubles, simultanées, ont été réalisées avec une quinzaine de cartouches du type prévu pour le creusement du tunnel d'irrigation. Ces explosions enregistrées sur des sismographes posés en divers endroits du *Castillo de Tomabal*, ont confirmé le risque et le rôle d'amortissement des ondes élastiques par le monument. Il a été ainsi possible de préciser la valeur de la charge explosive maximale autorisée pour creuser le tunnel d'irrigation.

Quant aux causes internes, les auteurs relèvent particulièrement la dégradation d'un principe de consolidation structurale, au fil du temps, basé sur l'intégration dans la masse de l'édifice de renforts verticaux et horizontaux en bois. Un système constructif qui a été élaboré il y a 1600-2000 ans et qui a autant souffert du saccage des *huaqueros* que de la pluie.

Sur cette question du diagnostic de l'environnement, nous nous sommes aussi référé à **Th. Joffroy**, (1997), à propos d'une étude de cas sur le projet de conservation des temples Ashantis du Ghana mené par le *Ghana Museum and Monuments Board*, avec l'appui du Centre du Patrimoine Mondial de l'UNESCO. On aura relevé dans l'un des rapports couvrant ce projet (juin 1997), une proposition de « relevé préliminaire » qui associe l'analyse de l'environnement culturel et social à la prise en compte du domaine « technique ». Ainsi, avant d'entrer plus directement dans un pré-diagnostic technique, l'auteur propose que l'on réalise une petite enquête d'intérêt culturel et social sur l'entretien des bâtiments (qui le prend en charge ? Est-il régulier ? Y a-t-il eu des travaux récemment effectués ?). Mais aussi sur l'intérêt pris par la population locale à la valeur du patrimoine. Et encore sur leur éventuelle capacité à se mobiliser pour assister l'institution nationale (le GMMB) dans les activités de conservation. Enfin il s'agit aussi de repérer s'il existe encore des artisans compétents dans l'environnement mais aussi de savoir s'il y a une activité touristique afin d'en

évaluer l'impact sur l'état du bâtiment ainsi que sur les futures options de mise en valeur.

En complément de cette enquête d'environnement culturel et social, l'auteur propose la réalisation d'un « relevé préliminaire » focalisant son intérêt sur les aspects suivants :

- l'environnement du bâtiment (physique, climatique, etc.) ;
- les pathologies : un simple constat factuel préliminaire ;
- une recherche préliminaire des causes ;
- une identification des principales menaces et des risques majeurs de détérioration (dans l'optique de proposer des éventuelles interventions d'urgence ou des consolidations préventives).

II.5. - Micro pathologie, biodégradation, sels et efflorescences

Notre revue de la littérature n'a relevé que très peu de propos sur la « biodégradation », particulièrement pour le domaine de la conservation des architectures de terre. Certes, le propos concernant ce thème existe dans le domaine de la conservation de l'architecture de pierre ou de briques cuites et il peut, en ce sens nous servir d'appui pour dégager des éléments de réflexion essentiels. Par ailleurs, les recherches sur la biodégradation des matériaux de construction ont connu au cours de ces années 90, un réel développement. Plusieurs réunions internationales ont été spécifiquement consacrées à ce thème. La dernière en date que nous avons relevé était organisée à Téhéran (Iran), en Novembre 1998, sous l'égide de l'ICCROM, de l'UNESCO et de l'ICHO-RCCCR de Téhéran. Par ailleurs, les chercheurs travaillant en étroite collaboration avec les opérateurs de terrain, sur des projets de conservation de l'architecture en terre, ressentent davantage la nécessité de développer des investigations spécifiques sur ces pathologies de biodégradation ou plus largement sur ce que l'on appelle aussi la « micro » pathologie. Des laboratoires d'Inde ont largement ouvert la voie et apportent des contributions sur cette question. L'IAA (Israel Antiquity Authority) en collaboration avec le GCI (Getty Conservation Institute), se préoccupent de ces questions sur quelques uns des sites en terre des époques bibliques (Age du Fer, Age du Bronze), comme Tel Dan. Mais pour l'heure actuelle, l'engagement d'une recherche spécifique sur la biodégradation des architectures de terre doit être considéré comme à peine naissant et sera sans aucun doute l'un des axes d'investigation de ce début du XXI^{ème} siècle. Nous rendons compte ici de propos de chercheurs qui ont davantage travaillé sur d'autres matériaux car des éléments de phénoménologie comme de symptomatologie, des éléments de méthode, peuvent être utiles à notre domaine spécifique. Par ailleurs, prenant en compte l'aspect « micro » pathologie, il nous a semblé idoine d'intégrer dans ce chapitre des propos scientifiques sur la dégradation par les sels solubles. Nous nous référerons ici, principalement aux travaux des chercheurs italiens et particulièrement à ceux du Professeur Torraca qui font référence.

Dans son ouvrage « les matériaux de construction poreux » (1988, 3^{ème} édition), en partie consacré aux processus de dégradation des briques, pierres et mortiers, **G. Torraca**, développe un chapitre spécifique sur la biodégradation. Il relève notamment l'action des bactéries et des champignons en explicitant le fait que les bactéries tirent l'énergie nécessaire à leur activité vitale de réactions chimiques non organiques, réduction ou oxydation, qu'elles ont la capacité de produire. De telles réactions peuvent résulter dans la formation d'acides

pouvant corroder les matériaux sensibles à l'acidité. L'exemple cité par Torraca est celui de la bactérie du cycle du soufre (thiobacille) qui peut synthétiser l'acide sulfurique à partir du soufre, des sulfures, ou même du dioxyde de soufre. Cette activité bactérienne doit être assez élevée pour engager un processus de corrosion qui peut être accompagné de formation de sulfate de calcium. G. Torraca évoque aussi une hypothèse similaire pour la bactérie du cycle nitrogénique produisant de l'acide nitrique. D'autres bactéries et champignons tirent leur énergie de l'oxydation des matériaux organiques et dégagent des acides organiques au terme de la réaction. L'un de ces acides est l'acide oxalique qui peut être à l'origine de la découverte d'oxalate de calcium dans les croûtes de surface des pierres anciennes. Torraca précise enfin qu'il n'est pas aisé d'évaluer l'importance de ces processus microbiologiques eu égard à la détérioration chimique et physique. Il est néanmoins probable que le processus physico-chimique puisse ouvrir la voie à une colonisation biologique qui est alors aidée par les acides réactifs.

II.5.1. - Algues, lichens et mousses

• Algues

Les attaques d'algues sur les matériaux de maçonnerie sont fréquentes dans les atmosphères humides. Néanmoins les processus de détérioration induits sont en général peu importants sauf de rares cas de gonflement et d'effritement qui ont pu être constatés à Borobudur, Java. Ainsi les dégâts causés par les algues sont plutôt d'ordre superficiels. Il nous est souvent arrivé de constater la prolifération d'algues sur des maçonneries en adobe, dans les régions de climat océanique, en Aquitaine (France). Notamment sur leurs soubassements en pierres ou en briques cuites, lorsque qu'une ambiance humide (stagnation d'eau, mauvais drainage) est entretenue par une impossibilité d'évaporation (exposition toujours à l'ombre)

• Lichens

Les lichens sont issus de la symbiose entre les champignons et les algues. Leur développement en surface des matériaux peut être impressionnant. Certains lichens (« crustaceous ») peuvent pénétrer les matériaux de quelques millimètres et le décomposer en produisant des acides organiques comme l'acide oxalique. Le processus de dégradation causé par les lichens est en général très lent mais peut être très défigurant, notamment pour les peintures murales. Leur nettoyage n'est pas facile.

• Mousses

Les mousses peuvent être très corrosives en surface mais aussi en profondeur des matériaux. Leur développement est favorisé par les surfaces alcalines telles que mortiers de ciment ou de chaux. En ce sens elles doivent retenir notre attention pour ce qui est des enduits de protection des édifices en terre. La présence de mousses peut être souvent constatée sur les maçonneries de terre, en climat pluvieux ou chaud et humide, sur les enduits comme sur le matériau terre lui-même.

II.5.2. - Sels solubles

Les sels solubles peuvent être directement présents dans les matériaux de construction ou être véhiculés par l'eau et notamment par les remontées

capillaires. Ils peuvent encore apparaître lorsque des gaz acides de l'air réagissent avec la surface des murs. Le processus de détérioration par les sels solubles est bien connu, au moins sous deux formes :

- les sels solubles attirent l'eau liquide (osmose) ou la vapeur d'eau (hygroscopicité) ; ils sont à l'origine d'une élévation de la teneur en eau critique et s'opposent au séchage de la maçonnerie ;
- les sels solubles cristallisent durant le processus d'évaporation de l'eau et génèrent des efflorescences désagréant la surface des matériaux.

Dans le cadre des journées sur la restauration et la conservation des monuments, organisées à Madrid, en avril 1989 (manifestation déjà référencée), **José Garralón Jorba** développe un propos sur les efflorescences comme mécanisme majeur de dégradation. Il en rappelle la définition fournie par les dictionnaires et également celle classique donnée par Jackson : « la formation d'un dépôt de sels minéraux solubles sur la surface d'une pièce céramique tenue exposée aux agents atmosphériques. » Logiquement ce sont les matériaux qui présentent une texture plus ouverte donnant plus de possibilité de mobilité à l'eau, qui sont les plus exposés au risque d'efflorescence. Cette texture ouverte est directement liée à la porosité. Il semblerait, selon l'auteur, que la limite inférieure d'absorption située à environ 6 % prémunissent les matériaux poreux de ce risque. Mais cette valeur n'est pas facilement obtenue dans les matériaux céramiques et *a fortiori* dans les maçonneries de terre. Ils sont ainsi très communément exposés.

Autrefois, les efflorescences étaient connues sous le nom de « salpêtre » que l'on récoltait sur la parties basses des édifices pour fabriquer des explosifs (poudre à fusil ; voir à ce propos un exposé du Docteur **Jochen Güntzel**, lors de la Conférence Terra 93, au Portugal). C'est sur l'évidence du phénomène, qui « affleure » ou « fleurit » qu'est né le mot « efflorescence ».

Les principaux sels présents dans les efflorescences sont :

- Na_2SO_4 - sulfate sodique
- K_2SO_4 - sulfate potassique
- MgSO_4 - sulfate magnésique
- CaSO_4 - sulfate calcique
- FeSO_4 - sulfate de fer
- CaCO_3 - carbonate calcique
- NaCO_3 - carbonate sodique
- ClNa - chlorure sodique
- VSO_4 - sulfate de vanadium
- KCO_3 - carbonate potassique

Il est aussi démontré que les sels qui apparaissent sur les parements extérieurs et intérieurs des matériaux, sont présents en des proportions différentes. Selon les données obtenues par **E. Schidt**, on distingue une « cryptoefflorescence » ou « inflorescence » (Mg, K, Na, Ca), à l'intérieur, et une « efflorescence », à l'extérieur (Mg, Ca, Na, K). Dans les « inflorescences » c'est la présence de CaSO_4 qui domine. L'auteur précise qu'il pourrait s'agir d'une séparation des sels se produisant durant la formation des efflorescences, du fait de la solubilité distincte des sels de sodium, de potasse et de magnésium, plus solubles que ceux de calcium. Les sels qui sont transportés plus facilement vers la surface sont ceux de Na, K et Mg, plutôt que de Ca.

II.5.3. - Raisons physiques de la production d'efflorescences

- la cristallisation des sels peut se produire du fait d'un refroidissement ou d'une évaporation.
- Une absorption supérieure à 6% favorise l'apparition des efflorescences.
- La taille et la forme des capillaires influe dans la mesure ou elle peut favoriser le mouvement de l'eau.
- Toutes les substances ne produisent pas des efflorescences avec la même facilité : les sulfates magnésiques et sodiques le font plus facilement que les sulfates potassiques.
- La façon dont le matériau est mouillé, puis séché : si l'eau pénètre dans le matériau du même côté d'où elle sera ensuite évaporée, l'effet est moindre que si le matériau est mouillé par toutes ses faces. Ainsi les efflorescences sont souvent plus visibles du côté de la face évaporante car l'évaporation transporte tous les sels solubles durant le processus.

L'auteur propose ensuite une classification des efflorescences selon leur type et leur activité de détérioration. Cette approche d'identification et de classement typologique nous semble intéressante à développer pour les efflorescences propres au matériau terre crue. Par ailleurs, le propos développé par l'auteur nous intéresse aussi dans la mesure ou nombre d'édifices en terre crue, dans beaucoup de contextes géographiques et culturels, sont dressés sur des soubassements en briques cuites et témoignent d'un catalogue de détails architecturaux ou d'éléments de modénature (tableaux de baies, corniches, chaînes d'angle, génoises, conduits de cheminée, sols), construits en « cuit ».

• *Typologie des efflorescences*

- Efflorescences de type I

On observe un abondant dépôt superficiel extérieur de sels blanchâtres qui sont très solubles à l'eau. Ils sont situés au centre et au bord des matériaux ; ils peuvent aussi couvrir le joint de mortier ; ils apparaissent au printemps quand le vent et le soleil assèchent les matériaux qui ont été mouillés par les pluies et l'humidité de l'hiver. Ces efflorescences sont généralement formées à partir de sulfate de sodium et de sulfate de potasse (Na_2SO_4 et K_2SO_4), qui se reconnaissent à leur saveur salée, à leur forme pulvérulente et arborescente, qui contiennent parfois du sulfate de magnésium (MgSO_4) de saveur amère. Ils peuvent aussi contenir du sulfate calcique (CaSO_4) qui est très adhésif et apparaît en forme de voile mat, de saveur non définie et peu soluble dans l'eau.

Efflorescences de type II

Se sont des sels qui sont présents sous la couche superficielle du matériau qui s'effrite facilement et qui apparaissent sous forme de sels blanchâtres. Ils sont formés à partir de sulfates de sodium, de potasse, de magnésium et de calcium. Ils se produisent quand l'eau circule lentement dans le réseau capillaire interne alors que l'évaporation est élevée. La cristallisation de ces sels se produit du côté intérieur au passage d'un état anhydre à l'état hydraté et l'augmentation du volume entraîne l'éclatement de la couche extérieure du matériau.

Efflorescences de type III

Ce sont des sels qui proviennent du ciment, en dépôts blanchâtres, en surface et en forme de traînées, très peu solubles dans l'eau. Ils produisent une effervescence lorsqu'ils sont soumis à de l'acide chlorhydrique. Durant son processus d'hydratation, le ciment libère de la chaux qui, lorsque l'eau s'évapore, se transforme en carbonate calcique en présence de l'anhydride

carbonique de l'air. Ces sels sont, semble-t-il moins dangereux pour le matériau, même s'ils affectent les façades.

Efflorescences de type IV

Elles se manifestent comme de grosses tâches de couleur brune, sur les briques de couleur rouge et le mortier. Elles semblent être produites par l'exsudation des composants ferreux présents dans certaines briques récemment fabriquées et exposées à la pluie. Ce sont des sulfates de fer qui, en contact avec l'air se transforment en hydroxydes ferriques $\text{Fe}(\text{OH})_3$ puis en oxyde (FeO_3) ; ils sont de couleur brune et insolubles dans l'eau. Ils sont assez peu fréquents et peu actifs sur la détérioration du matériau.

Efflorescences de type V

Ce sont des tâches de couleur marron foncé ou noir, qui apparaissent sur les briques et les mortiers. Ces efflorescences se distinguent de celles de type IV car leur coloration est similaire à celle de la brique. elles apparaissent sur les briques de couleur marron colorée à base de bioxyde de manganèse alors que celles de type IV apparaissent sur les briques rouges. En fait le bioxyde de manganèse réagit aux sulfates acides ou en présence de l'anhydride sulfurique de la brique pour former un sulfate de magnésium, SO_3Mg ; ce sulfate se neutralise au contact du ciment du mortier et se précipite en forme d'hydroxyde de manganèse, $(\text{OH})_3\text{Mg}$, qui se transformera postérieurement en oxyde de manganèse, Mg_3O_4 .

Efflorescences colorées

Elles se présentent parfois sous forme de tâches de couleur verte/jaune, couleur qui peut varier selon les conditions atmosphériques. Ces efflorescences adhèrent très fortement à la surface des briques et ne peuvent être facilement éliminées. Ces tâches sont dues à la présence de vanadium dans la brique, en forme de sulfate de vanadium, VSO_4 . Parfois, les briques contiennent du fer, du chrome, du nickel ou du manganèse et les sels issus de ces minéraux mis en présence d'eau produisent des tâches dont la couleur correspond au minéral dominant. Ces efflorescences peuvent apparaître lorsque les matériaux sont stockés pour leur emploi et exposés à la pluie ou à l'humidité du sol. Le vanadium provient du matériau brut ou du combustible. Il se rencontre sous forme insoluble dans les argiles et commence à se solubiliser à partir de 700°C et jusqu'à 1000°C . Puis au-delà, cette solubilité décroît rapidement. Comme la température de cuisson des briques dépassent rarement les 1000°C , la possibilité de solubiliser le vanadium, s'il est présent dans l'argile, est maximale.

II.6. - Le relevé des conditions ou de « l'état »

La question du relevé des « conditions » ou de « l'état » concernant les édifices bâtis en terre a particulièrement retenu notre attention. Il s'agit en effet de l'observation morphologique du bâti (matériaux, structure, architecture), et du compte-rendu phénoménologique des pathologies d'humidité et structurales, préalable à tout développement d'une étude symptomatologique conduisant à l'analyse-diagnostic. Le rapport de relevé des conditions ou de l'état, restitué sous forme de compte-rendu « factuel », associant le dessin, la photographie et le texte écrit, est la base indispensable à tout diagnostic. Et plus ce relevé des conditions sera « fouillé », plus le diagnostic sera complet.

Les sources documentaires que nous avons révisées constituent le plus souvent des études de cas et trop rares sont les propos qui théorisent cette question ; ou pour le moins fournissent des repères méthodologiques clairs et rigoureux. Il nous semble en effet que chacun des experts, sous différentes latitudes ou pour différents types de bâtiments étudiés, adoptent des démarches d'observation et utilisent des méthodes variées, au-delà de l'intégration plus ou moins rigoureuse de références méthodologiques d'ordre général. Ainsi, il est difficile de rendre compte d'un « système » ou d'un « modèle » de structuration d'un rapport de condition qui pourrait être plus systématiquement applicable. Mais on doit signaler ici que le nombre de plus en plus important d'expertises des bâtiments en terre réalisées au cours de cette décennie, a contribué au développement d'une réflexion sur les méthodes et procédures d'observation des conditions des bâtiments. Nous avons repéré des contributions récentes de plus en plus intéressantes à signaler dans la mesure où elles alimentent très directement la recherche dans le domaine. Nous passerons ci-après à travers différentes sources documentaires que nous commenterons. On remarquera dans l'ensemble, que les missions d'expertise réalisées donnent rarement le temps aux experts de développer un relevé détaillé des pathologies et qu'ils ne peuvent s'en tenir, le plus souvent, qu'à des constats préliminaires. Par ailleurs, ces relevés de l'état sont presque toujours associés à l'exposé d'une orientation générale des pratiques d'intervention, par voie de recommandations, où les auteurs semblent privilégier des interventions urgentes, immédiates ou à très court terme, de nature préventive et stabilisatrice, avant même d'avoir proposé des activités de « monitoring » de l'état (ou trop rarement). Le moyen et le long terme sont assez rarement mis en perspective. C'est sans doute le symptôme d'une époque qui « gère » le présent, la rentabilité immédiate et aussi, bien souvent, une pénurie de moyens en compétences humaines et en financement.

Par exemple, une expertise réalisée par **P. Odul**, (1990), sur une maison en pisé dans la région du Dauphiné, permet de relever des éléments de méthode « pratique » qui peuvent être discutés avec une théorisation de la question de l'expertise-diagnostic également développée par ailleurs par l'auteur (Conférence Adobe'90, Las Cruces, USA ; nous y reviendrons par la suite). Dans cette expertise P. Odul s'attache à introduire son rapport de condition par une description préalable de l'environnement du bâtiment et de ses abords proches, avant d'investir le bâtiment lui-même, des fondations/cave, en passant par les soubassements, les murs et les planchers. La description des pathologies, essentiellement d'humidité, est associée à une discussion sur les causes possibles, sous forme d'hypothèses. Cette approche est complétée par une description des facteurs pouvant aggraver ces conditions. Des mesures complémentaires de température extérieure et intérieure, d'humidité relative de l'air intérieur et extérieur sont corrélées avec des mesures à l'humidimètre. Mais aussi à des mesures de teneur en eau d'échantillons collectés, séchés à l'étuve, ainsi qu'à des mesures d'hygroscopicité du matériau réalisées à la base des murs affectés par l'humidité. Quelques mesures complémentaires au « Nitritest » visent à détecter la présence anormale de sels. Au-delà de ce rapport d'état développé de façon assez méthodique et très factuel, en ménageant des réserves sur l'interprétation des causes, l'auteur propose un ensemble de recommandations qui visent essentiellement à traiter l'origine des causes des pathologies d'humidité, sur un mode préventif, en intervenant essentiellement sur les drainages des eaux de surface et de rejaillissement depuis la toiture, et sur l'optimisation de l'évaporation de l'eau accumulée. Ces interventions semblent en effet justifiées dans la mesure où la stabilité structurale de l'édifice, point essentiel sur lequel l'expert a été consulté, n'est pas affectée.

Par ailleurs, une expertise réalisée par **Th. Joffroy**, (1992), sur le mur d'enceinte en pisé de la résidence consulaire française de Marrakech, Maroc, permet de rendre compte de la méthode adoptée par l'auteur. Tout d'abord, une présentation générale, globale, de l'ouvrage expertisé, suivie d'une description relativement détaillée du mur où l'auteur relève essentiellement la morphologie du système constructif, la typologie des matériaux employés dans la logique de leurs caractéristiques et propriétés. Le regard porté à l'environnement extérieur proche de l'ouvrage, pour chacune des orientations est également valorisé afin de repérer d'éventuels facteurs extérieurs pouvant avoir eu un impact sur les conditions actuelles de l'ouvrage. Par la suite, Th. Joffroy dresse un état des dégradations majeures constatées en les localisant, et complète cette description de l'état par une discussion sur les causes « probables ». Il s'agit en effet d'émettre des hypothèses qui devront être vérifiées par une étude plus poussée. Si quelques unes des causes probables peuvent être assez facilement validées par l'observation directe, toutes ne le sont pas. Aussi les solutions proposées pour le traitement des dégradations, sous peine de n'avoir pas assez poussé l'analyse des causes, peuvent être discutables. Mais l'expert est soucieux de répondre directement à l'attente de son client et surtout de garantir un traitement « préventif » afin de ralentir, voire stopper le processus de dégradation, avant d'envisager des interventions de caractère plus définitif qui seront également soutenues par un programme d'entretien. C'est ce qui est proposé en distinguant plusieurs options de « remise en état » avec quatre niveaux d'intervention envisageables et chiffrés quant à leurs coûts : 1 - prévention ; 2 - remise en état minimale ; 3 - remise en état extérieure et, 4 - remise en état complète. Ces options sont bien sûr tributaires d'une étude plus poussée si elle s'avère nécessaire, des urgences à traiter pour une stabilisation du processus de dégradation, des besoins et des moyens disponibles.

Un autre rapport de condition réalisé sur l'église San Estevan Del Rey, Pueblo d'Acoma, Nouveau Mexique, USA, par **E. Crocker, Alvin E. Romancito, Francisco Uviña et Rodney Waikaniwa**, (1995), a également retenu notre attention. On y trouve en première partie un exposé sur la documentation historique disponible faisant état de différentes études et de projets de restauration antérieurement réalisés, suivi d'une discussion sur l'histoire de la construction fondée sur un ensemble de chroniques. Cet exposé historique permet également de préciser, sous forme de tableau synthétique, les différentes étapes de construction depuis l'origine située en 1630, en passant par des étapes successives de nouvelles constructions, de réhabilitation, de campagnes d'entretien et de contrôle, jusqu'à une restauration récente de 1975. L'intérêt de cet exposé historique « synoptique » réside dans la relation établie par les experts entre les événements, les traits du bâtiments qui ont pu être affectés au cours de son histoire, les dommages causés et/ou les travaux entrepris et les références documentaires. Il s'agit là d'un modèle de méthode d'analyse historique mise en perspective avec l'objet de la conservation qui nous semble très intéressant à signaler. Le rapport de condition couvre uniquement les espaces extérieurs de l'église et du couvent et constitue donc un rapport préliminaire que les auteurs recommandent d'approfondir. Au-delà du constat des dégradations existantes, les auteurs ne discutent pas la recherche des causes et s'attachent plus fondamentalement à proposer, pour ce qui relèverait de « l'évidence », le développement d'activités de contrôle (monitoring) et des remèdes de nature préventive, c'est à dire pouvant apporter des réponses de caractère immédiat. Néanmoins, lorsque les dégradations observées sont difficiles à analyser, les auteurs proposent de pousser plus avant les recherches pour définir des modes d'intervention appropriés.

Dans un autre rapport de projet bénéficiant du soutien du Centre du Patrimoine Mondial de l'UNESCO, sur des sites Gambiens (*Stones Circles, James Island, Albreda, Juffureh et San Domingo*), bien que construits en pierres, **Th. Joffroy**, (1996), dresse un état général des différents sites expertisés. Il s'efforce de définir « l'état de conservation » des sites et de préciser le processus de dégradation qui a cours, ainsi que son mode de progression, afin d'identifier des « risques majeurs ». Par suite, des recommandations sont données pour développer un processus de conservation fondé sur la réhabilitation d'un savoir-faire local sur les pratiques d'entretien préventif, de restauration et réhabilitation, et de présentation des sites (dans la mesure où les faiblesses repérées quant à cet aspect sont actives sur le processus de dégradation). Dans une proposition méthodologique concluant ce rapport, l'auteur relève les difficultés économiques du pays et le potentiel limité de mise à disposition de fonds pour ce projet Gambien, qui oblige à développer une « stratégie réaliste » sur des objectifs immédiats et à court terme pouvant être atteints avec des apports limités. La priorité est donc donnée à la stabilisation des conditions actuelles en essayant de réduire au minimum les risques de dégradation et en dynamisant plutôt les pratiques de meilleur entretien ainsi que de meilleure gestion. Mais le futur devra être préparé en aidant les institutions nationales à trouver les moyens d'un projet plus ambitieux.

Dans un autre rapport d'expertise réalisé sur le « *Desert Development Center of the American University* » du Caire, Egypte, construit en adobe et conçu par l'architecte égyptien Aldy Naguib, disciple de Hassan Fathy, Hugo Houben, (1997, op.cit), introduit son rapport de condition par la présentation d'un « diagramme des causes », personnellement conçu, représentant en forme classique d'épi différents ensembles de facteurs pouvant contribuer, de façon convergente mais non hiérarchisée, vers la situation actuelle d'effondrement partiel du bâtiment expertisé. Ses différents ensembles de facteurs sont les suivants :

- les matériaux de construction de base (la terre), en distinguant les déficiences de fabrication, le degré d'activité des argiles et le manque de cohésion.
- la transformation, en relevant la question des chapes en béton réalisées par la suite.
- la conception architecturale, en relevant un système structural favorisant un « effet domino », l'existence de soubassements en béton, l'absence de barrière anticapillaire, des charges relativement élevées, une insuffisance des systèmes d'évacuation des eaux.
- L'environnement, avec le risque sismique, la hauteur de la nappe phréatique, élévation du niveau du sol, la présence de végétation dans les patios, le changement des conditions de pluviométrie.
- L'usage, en relevant le nettoyage à l'eau, l'arrosage des plantes.
- La qualité d'exécution des maçonneries d'adobe avec des déficiences de bourrage des joints et d'appareillage des briques d'adobe.
- L'entretien, avec des pratiques cosmétiques de « cache-misère » et une ignorance des indicateurs de contraintes d'efforts excessifs.

Ce diagramme proposé par H. Houben nous semble intéressant, même s'il doit être davantage développé et mieux hiérarchisé, car il relève toute l'importance des facteurs d'environnement, à différentes échelles et plans (physique, social, culturel), bien au-delà des seuls facteurs d'ordre technique. La tendance actuelle tend en effet à mieux prendre en compte ce type de facteurs « environnementaux » qui furent longtemps négligés.

Dans la publication de *Cornerstones Community Partnerships* (1998, op. cit.), nous avons aussi remarqué la méthode de relevé photographique des pathologies accompagnée d'une représentation graphique en formes d'icônes. Les auteurs distinguent ainsi un ensemble de 15 icônes qui couvrent les principaux facteurs de dégradation des murs en terre. La proposition est intéressante mais l'on observe encore la même difficulté que l'on peut avoir à distinguer la reconnaissance des faits (phénomènes et symptômes), de l'interprétation des causes. Ces quinze facteurs de dégradation retenus par les auteurs sont les suivants : humidité, végétation, pluie et neige, insectes, fissuration des enduits, fissuration structurale, tassement du sol, niveau de l'eau, accumulation de terre, neige, etc., rejaillissement, soleil, vent, charges structurales, feu et rongeurs. L'énoncé de cette liste permet en effet de repérer cette confusion entre les faits, les facteurs, et les causes. Mais on doit relever l'aspect intéressant de cette méthodologie très visuelle de relevé des conditions pouvant servir de base à l'élaboration d'une méthode plus rigoureuse.

En annexe de leur rapport d'évaluation du site de Pueblo Grande, Todd R. Metzger, Larry Nordby et Jim Trott (1988, op. cit.), présentent un ensemble de fiches destinées à développer des activités de stabilisation en passant par les étapes suivantes :

- d'une part, le pré-diagnostic fondé sur un relevé de l'état et sur une description de la ressource architecturale.
- d'autre part la définition et l'organisation des tâches de stabilisation de la structure et des matériaux utilisés.
- enfin, la procédure de contrôle (« monitoring ») et d'entretien courant.

Nous ne retiendrons dans ce chapitre que le premier aspect.

- Pré-diagnostic

Il est fondé sur un relevé de l'état et sur une description architecturale détaillée. Le pré-diagnostic passe d'abord par un exposé introductif, de caractère descriptif général. Cet exposé est suivi du traitement d'une fiche de pré-stabilisation des conditions structurales qui permet pour chacune des façades des corps de bâtiment, de préciser les conditions générales des murs et des matériaux de construction, les perturbations dites « naturelles », distinguées des perturbations « culturelles » (essentiellement l'impact des visiteurs). Des commentaires peuvent compléter les annotations, pour chacune des façades. Dans un deuxième temps il est proposé de remplir une fiche dite de « pré-stabilisation architecturale », qui passe aussi par une description introductive générale de l'architecture, suivie d'une fiche de description très détaillée, toujours pour les quatre façades, où sont pris en compte les aspects suivants : la culture constructive, la maçonnerie (son type, sa modulation, sa couleur, l'appareillage, la coupe du mur) et les principaux systèmes constructifs tels que soubassements, fondations, et enfin les dimensions des murs. Cette description architecturale est poursuivie par une description fouillée du système de construction des murs avec notamment la relation entre le mortier et le matériau de construction, toujours pour les quatre façades. Vient ensuite en complément, une description détaillée des traits ou caractéristiques des murs y compris les menuiseries. Enfin cette description architecturale se termine par une fiche concernant la toiture.

Dans le cadre du projet PREMA-Bénin II, de « Conservation et mise en valeur des palais royaux d'Abomey », associant l'ICCROM, CRATerre-EAG, l'UNESCO et la Direction du Patrimoine Culturel du Ministère de la Culture et des Communication de la République du Bénin, **Th. Joffroy et S. Moriset**,

(1996), ont développé une analyse des phénomènes de dégradation incluant une description détaillée des pathologies mais aussi une discussion sur les causes principales et secondaires. Ils ont aussi étudié les circonstances environnementales et propres aux bâtiments dans lesquelles se sont développées ces pathologies, point relevé comme très important par les auteurs car « les actions de prévention doivent viser à éliminer les causes et donc à mettre en place un environnement réduisant les risques de développement des pathologies ». La méthode proposée mérite d'être relevée car elle valorise fondamentalement l'importance des facteurs environnementaux (physique, climatique, social, culturel,) et un ensemble de facteurs dits « aggravants » liés à l'histoire du bâtiment, à son évolution, ainsi qu'à l'histoire des pratiques d'entretien permettant de relever des déficiences ou des attitudes inadéquates. De plus, les auteurs ont produit un effort de représentation photographique et graphique offrant une bonne lisibilité de l'information permettant de fonder, au-delà d'un rapport de condition très détaillé, un diagnostic efficace. Le document présente une valeur didactique certaine.

Dans cette approche détaillée des « circonstances et processus de dégradation » des Palais Royaux d'Abomey, visant à établir une compréhension préalable et indispensable les auteurs distinguent successivement plusieurs ensembles « d'actions » qui sont les suivants :

1 • *L'action de l'eau*, en distinguant :

- l'action directe de l'eau de pluie ;
- le talus détritique ;
- l'érosion ponctuelle ;
- les eaux de ruissellement à la base des murs ;
- les eaux de ruissellement sur les sols ;
- les eaux stagnantes ;
- les remontées capillaires ;
- la condensation.

2 • *L'action du vent*, avec :

- les efforts exercés par le vent ;
- les arrachements ;
- le transport des matériaux.

3 • *L'action du feu*.

4 • *L'action de l'homme*.

5 • *L'action des végétaux*, avec :

- les champignons ;
- les mousses ;
- les herbes et plantes ;
- les arbres.

6 • *L'action des animaux*, avec :

- les termites ;
- les rats ;
- les cochons.

Puis, sont décrits :

7 • *les facteurs aggravants propres aux bâtiments*, qui sont :

- l'évolution et les transformations subies ;
- les toitures ;
- les couvertures de tôle ;
- les couvertures de chaume ;
- les charpentes ;
- les faux-plafonds ;
- les murs ;
- les enduits ;

- les sols ;
- les trottoirs ;
- les bancs ;
- les talus.

Le propos développé par Th. Joffroy et S. Moriset relève la diversité des circonstances et processus de dégradation. Il est ainsi possible de distinguer des processus « simples », de processus « combinés » ou « complexes ». Car, les pathologies observées, sur le site d'Abomey - mais aussi comme dans beaucoup d'autres situations - résultent de l'action en chaîne (effet « domino » des processus de dégradation, une pathologie en générant à son tour une autre), jusqu'à exposer le bâtiment à un risque majeur de destruction. On peut en effet facilement identifier des processus simples de dégradation et en définir les causes et leurs origines (érosion de surface par la pluie, par exemple). Mais, les processus combinés résultent de causes multiples (remontées capillaires, par exemple). Revenant sur les processus en chaîne un exemple est donné par les auteurs, très significatif. Citons : « partons d'une tôle rouillée qui finit par être percée, laissant couler de l'eau sur la charpente en bois. Le bois humide est facilement attaqué par des champignons qui vont préparer le terrain aux termites qui finissent par détruire entièrement une partie de la charpente. La fixation de la tôle n'étant plus assurée, elle est emportée lors d'une tempête, laissant une ouverture importante au-dessus de la construction. Dès lors, l'eau peut pénétrer à l'intérieur du bâtiment. Elle stagne au niveau du sol car aucun drainage n'a été prévu et s'infiltre dans les murs qui s'affaiblissent. Les murs se détériorent aussi en leur partie supérieure et un talus détritique se forme à leur base. Des graines viennent se déposer et des plantes commencent à pousser, réduisant la capacité porteuse du mur qui finit par s'écrouler. La brèche résultant de l'écroulement laisse entrer les tempêtes qui emportent la toiture ». Scénario « catastrophe » qui peut pourtant ne pas être inexorable si l'on intervient lors de ce processus pour casser la chaîne de circonstances et de processus de dégradation. Quant aux processus « complexes », les auteurs entendent désigner ceux qui exigent une étude approfondie afin de bien en déterminer les causes et leurs origines qui ne sont pas du tout évidentes sur le seul constat phénoménologique et symptomatologique. Ce sont là des processus qui exigent généralement tout un ensemble de mesures complémentaires, sur l'objet lui-même mais aussi dans son rapport à l'environnement.

Dans leur chapitre consacré aux « facteurs aggravants propres aux bâtiments », Th. Joffroy et S. Moriset relèvent toute l'importance de la prise en compte de l'histoire des Palais Royaux d'Abomey qui traduit l'évidence de destructions plus ou moins importantes résultant d'événements catastrophiques (séisme, incendie) et qui ont donc été suivis de restaurations et reconstructions successives. Par ailleurs, les « améliorations » réalisées au cours de ce XX^e siècle, dans un contexte socio-économique et culturel en pleine évolution ont contribué à rompre l'équilibre originel de l'architecture, des structures, des matériaux et de leur rapport à l'environnement. Cette évolution et ces transformations subies par les bâtiments au cours de l'histoire est un facteur très important à prendre en compte pour pouvoir expliquer certaines des circonstances et certains processus de dégradation de nature « combinée » ou « complexe ».

II.7. - L'évolution du propos sur les méthodes de diagnostic

Notre révision de la littérature sur la conservation de l'architecture de terre de ces quinze dernières années, fait clairement ressortir une évolution du propos sur le diagnostic et particulièrement sur les « méthodes » de diagnostic. Jusqu'à la fin des années 80, les chercheurs et les opérateurs ne disposent pas de « modèles » ou de « guides méthodologiques » propres à l'établissement d'un diagnostic spécifique sur les architectures de terre. Ils sont donc en recherche, s'inspirent d'autres modèles théoriques en usage pour la « restauration » des architectures de « bâtiments anciens », ils expérimentent, testent, tentent de dépasser leurs hésitations, doutes et confusions. Par ailleurs, on aura aussi remarqué que l'intérêt des chercheurs s'est davantage porté sur la question de la pathologie d'humidité, délaissant ou n'abordant de façon que très superficielle la question de la pathologie de structure. Cette période est donc particulièrement intéressante et nous avons voulu, ici, rendre compte de cette évolution de la pensée théorique et méthodologique, du discours et de l'expérience, à travers un choix de documents.

II.7.1. - La recherche d'un positionnement spécifique

Dans le cadre du colloque réalisé à l'E.N.T.P.E. (France, 1987) une communication de **P. Scarato**, (association « Pisé Terre d'Avenir », France), architecte spécialiste en restauration de bâtiments anciens en pisé dans la région Auvergne, fait le point sur son expérience acquise et donc sur les enseignements issus d'une intervention constante sur le terrain de la restauration du pisé. L'auteur caractérise sa démarche en plusieurs points :

- 1 - Une connaissance approfondie du patrimoine et des savoir-faire.
- 2 - Une analyse et une approche du bâti sous tous les angles, avec :
 - . une recherche de l'histoire du bâtiment et une analyse de son évolution ;
 - . une analyse architecturale ;
 - . une analyse technique sur les caractéristiques de départ du matériau terre.
- 3 - Une connaissance de la pathologie et du diagnostic en distinguant :
 - . une pathologie « classique » ;
 - . une pathologie « terre » ;
 - . le diagnostic d'un « ensemble bâti » et non d'une somme d'éléments constitutifs.
- 4 - Des conseils et des choix de restauration et de réhabilitation (et non de « rénovation »).

Sur l'aspect spécifique de la pathologie, l'auteur distingue :

a - L'humidité, qui constitue le problème principal dans le cas d'un mauvais entretien du bâti mais aussi dans le cas de restaurations peu anciennes qui induisent une nouvelle pathologie d'humidité parce que l'équilibre hydrique originel du bâtiment en terre, comme celui de tout bâtiment traditionnel construit en matériaux poreux et capillaires a été rompu. P. Scarato relève alors le type de problèmes d'humidité les plus courants qu'il a été amené à diagnostiquer sur le terrain :

- les remontées humides apparaissant sur des revêtements neufs ou refaits ;
- l'humidité accompagnée de sels ;
- l'humidité dans les angles du bâtiment.

b - La surface du mur, avec comme principal exemple de problèmes pouvant être diagnostiqué :

- les enduits fissurés.
- c - Les problèmes de structure avec, comme principaux problèmes :
 - les fissures de structure « vivantes » ;
 - des drainages affouillant les fondations ;
 - des tassements causant des fissures.
- d - D'autres types de problèmes courants :
 - la thermique et le chauffage, les problèmes d'isolation intérieure ou extérieure ;
 - la ventilation et l'aération

Au-delà de quelques études de cas qui concluent la communication, le propos de l'auteur, analysé plus en détail montre encore une tendance à une forme de « globalisation » des niveaux d'analyse-diagnostic, entre les phénomènes et les symptômes, l'interprétation ponctuelle des causes et l'ordonnance de remèdes. On constate aussi une difficulté à aborder de façon méthodique les différents niveaux de problèmes et de désordres, à savoir les problèmes d'humidité, de structure, la question des facteurs extrinsèques et intrinsèques. L'expérience ne suffit pas encore ici à fonder un propos théorique clair même si l'ambition est de le faire avancer.

Dans le cadre des journées sur la restauration et la conservation des monuments, organisées à Madrid, en avril 1989 (manifestation déjà citée), Mme **Jesús Guinea**, Architecte, a proposé une communication sur le thème des méthodes de diagnostic et d'essai, propre à la construction en terre crue. L'auteur relève d'emblée que l'on ne peut s'intéresser aux édifices anciens sans développer des recherches sur les savoir-faire, les connaissances et les actions intégrées dans la mémoire de cette « terre construite ». L'importance du détail architectural est essentiel pour garantir une protection contre différents types de désordres et son étude permet d'acquérir les anciennes bonnes manières de construire. Ainsi, un « diagnostic lié à la connaissance des éléments traditionnels et de la pathologie, permet de résoudre les problèmes et de revaloriser les édifices en terre ». C'est l'étude du processus de la construction en terre, depuis l'élaboration jusqu'à l'entretien, en passant par la réalisation, qui permet de retrouver le savoir-faire constructif et de constituer les bases d'une analyse pathologique sur les différents traitements spécifiques de ce type de matériau. Au dicton qui rappelle que « toutes les constructions en terre doivent avoir de bonnes bottes et un bon chapeau », l'auteur précise qu'il conviendrait d'ajouter : une bonne conception, une bonne réalisation et un entretien qui préserve un « équilibre ».

Le diagnostic des causes et des dommages ne doit pas se limiter aux simples caractéristiques du matériau, il doit prendre en compte la conception, la construction, l'usage et l'histoire de l'édifice.

Au-delà de cette introduction générale, l'auteur développe un propos sur la phénoménologie et la symptomatologie des types de lésions. On retrouve alors différents niveaux de considération mêlés qui distinguent mal les problèmes observés, de leurs causes et de leurs modes de traitement. Cette confusion comme on l'aura précédemment remarquée caractérise assez bien le propos scientifique de l'époque.

II.7.2. - Une méthode de référence qui fut inspiratrice, en France, au Maroc

L'ouvrage de **Raymond Collombet**, « L'humidité dans les bâtiments anciens », (ANAH, 1984, réédité en 1989), se fonde sur une étude réalisée par le Centre expérimental de recherches et d'études du bâtiment et des travaux publics (CEBTP). Il vise à réaliser une synthèse des connaissances actuelles dans le domaine de l'humidité des bâtiments anciens (ceux construits avant 1948, dans le langage administratif français). Bien que non directement concerné par l'architecture de terre, la qualité didactique de cet ouvrage, notamment sur l'aspect des méthodes et de l'analyse-diagnostic d'humidité, mérite d'être relevée. On pourra aussi apprécier les informations fournies sur les techniques de mesures instrumentales de l'humidité, même si les techniques présentées sont plus directement utiles pour les ouvrages bâtis en pierre. Le livre est structuré en quatre parties.

- La première entend expliquer comment agit l'humidité et quels peuvent être ses effets.
- La deuxième partie est consacrée au diagnostic, conçu comme « l'auscultation » du bâtiment, et à la détermination de la nature et de l'origine des maux. « Pas de bon remède sans bon diagnostic ». L'auteur relève, qu'au stade de l'examen général du bâtiment, il est nécessaire de dresser l'inventaire des manifestations d'humidité, puis de les interpréter. En cas de doute sur les origines des manifestations d'humidité, il faut pousser plus loin l'analyse en ayant recours à des mesures instrumentales qui permettront de confirmer ou d'infirmer les hypothèses formulées lors de l'examen général du bâtiment.
- La troisième partie concerne les remèdes : contre les remontées capillaires et contre la condensation, contre les infiltrations directes de la pluie. Raymond Collombet précise que dans cette troisième partie de l'ouvrage, on trouvera aussi ce que l'on ne doit pas faire. Propos précieux car la lutte contre l'humidité présente selon lui deux particularités par rapport aux autres pathologies du bâtiment : d'une part, la pléthore de remèdes existant sur le marché ; d'autre part, la confusion couramment faite entre les causes du mal et ses effets, confusion qui conduit bien souvent à s'attaquer aux effets en aggravant les causes. Il faut donc savoir éliminer les traitements inadéquats, voire dangereux.
- La quatrième partie regroupe des documents techniques et réglementaires.

Dans ce thème de notre révision de la littérature, nous nous intéresserons plus précisément à la deuxième partie, le diagnostic. Ce qui relève des remèdes sera répercuté sur le troisième thème de notre révision : les interventions. Néanmoins, la qualité didactique de la première partie de l'ouvrage mérite que l'on s'y arrête.

Dans cette première partie, Collombet nous rappelle les mécanismes de pénétration de l'eau dans les matériaux de construction, par leurs « ouvertures » (fissures, pores, canaux capillaires) :

- la gravité ;
- l'énergie cinétique des gouttes résultant de l'effet du transport par le vent pouvant favoriser la pénétration de l'eau ;
- la pression du vent favorisant la pénétration de l'eau par les fissures ;
- la capillarité ascensionnelle par les pores et tubes capillaires.

L'auteur nous rappelle ensuite les caractéristiques physiques des matériaux ayant une influence sur leur comportement au contact de l'eau. Ces caractéristiques physiques permettent de classer les matériaux :

- la *porosité* ou présence de vides (pores, canaux), dans la masse du matériau ; la porosité est égale au volume total des vides qu'il comporte rapporté (en %) à

son volume total apparent. Il existe deux sortes de porosité, la porosité fermée (les pores ne communiquent pas entre eux, le matériau est imperméable), et la porosité ouverte (les pores communiquent entre eux, le matériau est perméable). La porosité est plus élevée pour les matériaux tendres et « poreux ».

- la *porométrie* qui désigne la répartition des pores ouverts d'un matériau en fonction de leurs dimensions. Elle se représente sous la forme d'un histogramme mettant en rapport la porosité ouverte (en % et en ordonnée), et le diamètre des pores (en microns et en abscisse).

- la *capillarité* désignée par une entité numérique représentative du pouvoir d'absorption d'eau, le coefficient de capillarité.

Collombet décrit ensuite le mécanisme d'évasion de l'eau ayant pénétré dans le matériau, par évaporation. Il rappelle que le mécanisme d'évaporation décrit deux phases. Une première phase, d'assez courte durée, mais avec une vitesse d'évaporation quasi constante et à un niveau élevé faisant très rapidement décroître le taux d'humidité moyen du matériau. Une deuxième phase, avec une vitesse d'évaporation qui décroît très fortement et avec un taux d'humidité moyen qui ne diminue alors plus que très lentement.

Vient ensuite la description des différentes formes d'humidité, leurs origines et leurs manifestations :

- l'*humidité ascensionnelle* ou les remontées capillaires. Les origines en sont principalement issues du contact de la base des murs avec l'eau : nappe phréatique, terrain capillaire ou terrain peu perméable ralentissant la vitesse d'infiltration dans le sol, ou favorisant le ruissellement de surface. Les manifestations sont des traces d'humidité dont la hauteur dans les murs dépend de l'équilibre entre le débit des remontées capillaires et celui de l'évaporation.

- Les *infiltrations d'eau de pluie*. Les origines en sont les déficiences telles que fissures des maçonneries, défauts de liaison entre les divers matériaux, dégradation du mortier des joints, défauts diverses des enduits, défauts d'étanchéité entre les menuiseries et le gros œuvre, défauts d'étanchéité entre les différentes parties de menuiseries. Les manifestations des infiltrations peuvent être ponctuelles ou plus générales selon l'ampleur des déficiences. Il peut aussi y avoir des infiltrations latérales, par rejaillissement sur la base des murs ou dans les parois enterrées à travers le terrain depuis le sol de surface.

- L'*humidité de condensation*. On distingue la condensation superficielle (l'air ambiant se refroidit et atteint son point de rosée au contact d'une paroi donnant sur l'extérieur), et la condensation interne, plus sournoise (la migration de vapeur d'eau à travers la paroi, de l'intérieur vers l'extérieur, atteint une température du matériau dans son épaisseur qui correspond à son point de rosée et se condense dans la masse du matériau). Les causes de l'humidité de condensation sont principalement la production de vapeur, le mode de chauffage, le confinement de l'air. Les manifestations apparaissent par priorité dans les pièces humides, dans les pièces moins chauffées, dans les locaux où l'air est confiné, sur les parois froides, à l'endroit de ponts thermiques (création d'un point froid sur la face interne d'une paroi).

- L'*humidité d'origine accidentelle*. Elle est généralement liée à tous les réceptacles de la pluie et à tous les ouvrages destinés à la circulation des eaux et, notamment : aux toitures en pente, toitures terrasses, chenaux, gouttières et descentes d'eau, aux postes de distribution d'eau communs, aux pièces d'eau et canalisations de toute sorte. Mais aussi à certaines pratiques : lessivages intempestifs, nettoyage des façades par voie humide, apports « d'eau de construction » à l'occasion de certains travaux d'aménagement.

- Les *combinaisons de plusieurs types d'humidité* : la combinaison infiltration + condensation.

Vient ensuite un exposé sur les dommages de l'humidité se traduisant en « altération des matériaux et des ouvrages ». Raymond Collombet distingue alors :

1 - Les dommages dus à la seule action de l'eau :

- La modification des caractéristiques physiques des matériaux de construction sous l'effet de l'humidité (variations dimensionnelles, diminution de leur résistance mécanique et augmentation de leur conductivité thermique).
- Les dommages entraînés par les entraves à l'évaporation : enduits trop étanches sur murs humides qui gonflent, boursoufflent, cloquent ; mortier de rejointoiement trop riche qui se détachent et dégrade la maçonnerie. Peintures trop étanches qui cloquent et s'écaillent .
- La dégradation de certains matériaux de construction sous l'effet de l'eau. R. Collombet cite ici la terre crue mais aussi des matériaux tendres comme les grès calcaires, ou encore d'une manière générale les matériaux feldspathiques qui peuvent subir un processus de modification morphologique.

2 - l'humidité constitue le véhicule des altérations.

- Le gel. La sensibilité au gel est très liée à la porométrie du matériau. Les effets du gel ne se produisent que lorsque la teneur en eau du matériau atteint une certaine quantité « critique ». Les matériaux à pores fins ($< 10 \mu$) atteignent plus facilement cette teneur en eau critique que les matériaux à pores gros ($> 10 \mu$).
- Les efflorescences et cryptoefflorescences (cristallisation intérieure). Lors du processus d'évaporation les sels présents dans l'eau et dans les pores cristallisent et expansent : efflorescences, effritements, détachement par plaques. Les sels les plus solubles qui sont à l'origine de ces phénomènes sont : les sulfates de sodium, les nitrates de sodium, le nitrate de potassium (salpêtre).
- Les tâches de bistre. Le bistre est constitué de goudrons et produits volatils que véhicule la vapeur d'eau contenue dans les fumées. Il apparaît souvent au voisinage des conduits de fumée.

3 - Les altérations en milieu humide.

- La corrosion des matériaux : oxydation, rouille.
- Les proliférations végétales : mousses et lichens, moisissures, champignons du bois.
- Les maladies de la pierre (généralement dans les zones humides) : la desquamation (décollement de croûtes et de plaques) ; la désagrégation sableuse et l'alvéolisation (détachement du matériau sous forme pulvérulente, création de sillons ou d'alvéoles dus au vent mais aussi à une action bactérienne).

Dans la deuxième partie de son ouvrage, Raymond Collombet précise qu'il convient de procéder à un diagnostic en deux phases :

1 • une première phase d'examen général qui consiste à collecter le plus grand nombre possible de renseignements sur le ou les bâtiments et sur les « manifestations » de l'humidité, renseignements que l'on essaiera ensuite « d'interpréter ». Lors de cet examen général on doit noter et analyser notamment :

- l'emplacement et la constitution des ouvrages atteints ;
- la nature des dégâts ;
- l'importance des dégâts ;
- la date d'apparition des dégâts ;
- les traitements déjà effectués et leurs résultats.

Cet examen peut suffire pour déterminer les causes de l'humidité. Mais si l'on n'a que des présomptions, il convient alors de prévoir une deuxième phase d'examen.

2 • Cette deuxième phase d'examen introduit le recours à des « mesures instrumentales »

Durant la première phase d'examen général, il s'agit principalement d'effectuer des observations « visuelles ». Néanmoins on peut aussi s'aider de petits appareils comme :

- un « humidimètre de poche » . Ces appareils utilisent la variation de la résistance électrique que l'on mesure entre deux électrodes à fiches placés au contact du matériau ou enfoncés plus ou moins profondément. Ces appareils ont en général été conçus pour mesurer la teneur en eau des bois et sont donc étalonnés pour des essences déterminées. Ils sont sensibles à la présence de sels qui influence la conductivité des matériaux (ceci a été relevé dans notre premier chapitre, cf. M. Bendakir, à propos du site de Mari, Syrie).
- d'autres appareils utilisent la variation de la constante diélectrique que l'on mesure entre deux électrodes en plaques intégrés à la partie inférieure d'un boîtier placé en contact avec le matériau. Ils sont conçus pour mesurer le taux d'humidité, ou plus exactement pour vérifier la siccité des enduits avant d'entreprendre des travaux de peinture. De ce fait ils sont étalonnés pour le plâtre fin ou le mortier hydraulique. Leur utilisation est moins influencée par la présence de sels mais plutôt par la pression plus ou moins forte exercée par l'opérateur.

Collombet expose ensuite le déroulement du diagnostic.

1 • Considérer d'abord les manifestations d'humidité affectant l'extérieur du bâtiment, en suivant une séquence en deux phases :

- d'une part, les manifestations affectant la partie inférieure des murs ;
- d'autre part, les manifestations affectant les murs à tout niveau.

a - *Les manifestations affectant la partie inférieure des murs.* L'auteur rappelle qu'elles peuvent avoir trois causes possibles :

- les remontées capillaires ou humidité ascensionnelle ; leur manifestation est en général une zone humide continue. L'observation de constructions voisines ayant les mêmes manifestations permet de supposer *a priori* que le phénomène en jeu est celui de remontées capillaires alimentées par la nappe phréatique.
- une infiltration de la pluie par rejaillissement ;
- une infiltration d'origine accidentelle.

Pour ces deux dernières causes les manifestations sont en général une frange humide discontinue qui ne peut affecter qu'une partie des murs. Mais il faut procéder par élimination de plusieurs hypothèses en examinant les causes possibles de ces manifestations : problèmes de canalisations d'alimentation ou d'évacuation, rejaillissement ponctuel de la pluie, nature du sol environnant, sa morphologie, (remblai, rehaussement), système de drainage, évolution des manifestations dans le temps, exposition des ouvrages au soleil et au vent, nature des matériaux et des systèmes constructifs (types de fondations, épaisseur des murs), existence dans l'environnement du bâtiment d'équipements tels que canalisations ou fosses enterrées, arrosage des plantations, etc.

b - *Les manifestations affectant les murs à tout niveau.* Le degré de gravité des problèmes d'humidité peut ne pas être évident *a priori*. Il faut pousser l'examen pour distinguer les manifestations qui traduisent une véritable invasion d'eau de

celles qui traduisent une présence d'humidité. On doit alors distinguer ce que l'on désigne communément sous le terme de « spectre » ou de « fantôme » qui sont constitués par la trace des joints de la construction sous-jacente apparaissant à travers l'enduit de parement. Ils peuvent résulter de la différence des matériaux de construction employés, de leur hétérogénéité capillaire, de la variation de leurs qualités hygroscopiques, du degré d'humidité ambiant de l'air, d'éventuelles voies de pénétration de l'eau (fissures), de la proximité de zones plus « critiques » (bandeaux corniches, saillies diverses), etc.

2 • Considérer les manifestations affectant l'intérieur du bâtiment.

a - Les manifestations affectant les caves. On peut être confronté à :

- des remontées capillaires ;
- des condensations ;
- des infiltrations latérales ;
- une humidité d'origine accidentelle.

Pour diagnostiquer avec précision les causes du mal, il faut alors considérer les problèmes à plusieurs niveaux :

- Considérer d'abord les murs : frange humide continue (remontées capillaires) ou discontinue (origine accidentelle), humidité intéressant toute la hauteur des murs (remontées capillaires et/ou infiltration latérale, condensation).
- Considérer ensuite les plafonds des caves et la situation de la cave : sous une cour ou un jardin, sous des locaux exposés au froid, sous des locaux occupés, etc.

b - Les manifestations affectant les rez-de-chaussée.

- Considérer tout d'abord les murs : frange humide continue, discontinue ou murs humides sur toute leur hauteur.
- Considérer ensuite les planchers des rez-de-chaussée et les manifestations d'humidité qui les affectent (tâches, mouillures plus ou moins importantes, etc.). Les causes sont soit des remontées capillaires (uniformes ou éparpillées), soit des condensations. Elles dépendent en général de l'hétérogénéité des matériaux des dalles ou pavements.

c - Les manifestations affectant tout niveau d'un bâtiment. Au delà du premier niveau du bâtiment des manifestations d'humidité peuvent exister qui peuvent avoir pour origine

- la condensation ;
- une infiltration de la pluie ;
- une cause accidentelle.

Il faut alors émettre et vérifier des hypothèses et procéder par éliminations successives. Dans le cas de condensations, les origines peuvent être la production de vapeur dans les pièces humides, l'absence ou l'intermittence du chauffage, le confinement de l'air, des ponts thermiques localisés, le rythme de vie ou d'activité des occupants. S'il s'agit d'une infiltration d'eau de pluie, il faut alors considérer l'exposition de la façade, d'éventuelles déficiences de la construction (hétérogénéité des matériaux, fissures, joints dégradés, enduit dégradés, etc.). Enfin s'il s'agit d'une humidité d'origine accidentelle, il faut déterminer l'origine de l'agression qui peut ne pas se situer dans la proximité immédiate de la manifestation d'humidité mais provenir de migrations de cette humidité à travers les maçonneries. Il faut alors examiner tous les points d'eau, les cheminements de l'eau (canalisations). Mais ces problèmes peuvent être d'origine complexe. C'est souvent le cas au voisinage des ouvertures qui peuvent cumuler les infiltrations directes, la condensation superficielle, les ruissellements et infiltrations cachés, etc.).

d - *Les manifestations affectant les combles et greniers.* Ce niveau des édifices peut aussi être affecté par des problèmes de pluie et d'humidité résultant d'infiltrations, de condensations. Les origines sont soit accidentelles (fuites, dégradations localisées de la couverture), soit provenir d'un manque d'aération.

Raymond Collombet conclue ce chapitre sur le diagnostic avec un tableau récapitulatif des éléments de diagnostic. Il met alors en relation trois composantes majeures du diagnostic :

- la nature des manifestations d'humidité (les phénomènes les symptômes) ;
- les causes « probables » (hypothèses) ;
- les observations « nécessaires » pour établir le diagnostic.

Le tableau reprend alors la séquence complète du diagnostic en passant successivement par :

- l'extérieur du bâtiment ;
- l'intérieur du bâtiment : caves, rez-de-chaussée et tout niveau.

Au-delà du diagnostic des manifestations d'humidité visibles ou superficielles, il convient peut-être de déterminer l'état d'humidité « en profondeur ». Des sondages sont alors nécessaires.

1 • Mesures de la teneur en eau des matériaux.

a - *Mesures de l'humidité par prélèvements et pesées.* La méthode consiste à prélever à l'endroit et à la profondeur souhaitée une faible quantité de matériau, de le peser à son état humide au moment du prélèvement puis à son état séché. On détermine alors la masse d'eau que contenait le matériau. Le prélèvement s'effectue par forage à faible vitesse de rotation pour éviter l'échauffement du matériau. On choisit divers points de prélèvement en fonction de la loi de variation de l'humidité, de bas en haut et en profondeur, de l'intérieur vers l'extérieur ou vice versa. On peut alors opérer une pesée immédiatement, sur le site, ou envoyer les échantillons en laboratoire mais alors dans des récipients hermétiquement fermés, pour éviter toute modification de la teneur en eau. Le séchage peut aussi s'effectuer sur le site, à l'aide de fours portatifs (micro-ondes), ou par combustion, ou en laboratoire. L'interprétation des résultats peut se faire selon des méthodes de calcul différentes en prenant en compte les paramètres suivants : M_h ou masse de l'échantillon humide ; M_s ou masse après dessiccation ; et V ou volume. Les formules différenciées sont alors les suivantes : $M_h - M_s / M_h$ ou, $M_h - M_s / M_s$ ou, $M_h - M_s / V$.

En conclusion de ce chapitre, Collombet fournit un tableau graphique très facile à lire et représentant la relation entre les sondages à effectuer dans les murs (position des sondages en coupe et en élévation), les résultats des mesures avec une légende rendant compte de différents niveaux d'humidité constaté (humidité décroissante, humidité constante mais à faible teneur en eau, humidité constante mais à forte teneur en eau). Ce tableau décrit aussi la nature du phénomène humide (remontées capillaires dans le mur, dans l'enduit, rejaillissement de la pluie, infiltration latérale de la pluie par le sol, condensation superficielle, infiltration directe de la pluie, condensation + infiltration directe de la pluie). Il donne aussi une représentation pour les sondages dans les sols en décrivant la nature des phénomènes d'humidité typiques : remontées capillaires ou condensation.

b - Autres méthodes de mesure de l'humidité .

- Mesures par réaction chimique avec le carbure de calcium. L'échantillon réduit en poudre est déposé dans une bouteille spéciale contenant un composé de carbure de calcium. On mesure alors à l'aide d'un manomètre la pression du

gaz d'acétylène dégagé par la réaction de l'eau du matériau avec le carbure de calcium. Cette pression est aussitôt traduite en taux d'humidité par rapport à la masse humide du matériau.

- Mesures à l'aide de sondes diélectriques. On dispose dans l'épaisseur de la paroi des sondes d'humidité dont le comportement sera identique à celui d'un condensateur, le diélectrique étant constitué par le matériau dont on veut mesurer l'humidité. A l'aide de ces sondes on peut suivre dans le temps l'évolution de la résistance et de la capacité électrique de l'ensemble sonde-matériau, donc l'évolution de l'humidité dans le matériau (en ayant établi la courbe d'étalonnage reliant la propriété électrique mesurée au taux d'humidité du matériau testé). Cette méthode est en général utilisée en laboratoire par des opérateurs expérimentés.

- Mesures par thermographie. A l'aide d'une caméra infrarouge, on détecte les zones humides (interprétation des radiations infrarouges émises par les corps). L'appareil permet en effet de visualiser et de photographier les différences de température à la surface d'une paroi, donc de distinguer les zones humides des zones sèches. Le matériel est assez sophistiqué et utilisé par des opérateurs expérimentés. Le coût de cette mesure est assez élevé.

- Autres mesures à l'aide de méthodes diverses. Collombet évoque alors différentes méthodes de mesures en laboratoire, telles que les mesures en hyperfréquence par des appareils prenant en compte l'absorption préférentielle de certaines ondes électromagnétiques par l'eau contenue dans les matériaux. Il relève toutefois que ces appareils ne donnent qu'une indication globale de la teneur en eau et ne permettent pas de déterminer si la répartition d'eau est homogène ou pas. Il évoque aussi les mesures à « l'humidimètre neutronique », essentiellement utilisé en génie civil, qui mesure la variation de densité de neutrons dans le matériau, en fonction de la distance à leur source d'émission appliquée en surface. Cette méthode pose le problème de l'étalonnage des appareils et nécessite des opérateurs expérimentés.

2 - Mesures d'humidité et de la température de l'air.

Le degré d'humidité relative de l'air ambiant, ou degré hygrométrique, peut avoir une influence sur les problèmes d'humidité et notamment sur les problèmes de condensation. Plusieurs types de mesures existent pour préciser cet aspect.

- Les hygromètres à cheveux enregistreurs. Ils peuvent rendre compte simultanément de la mesure de l'humidité relative et de la mesure de température de l'air. Ils sont utiles pour connaître la variation dans le temps de ces mesures (sur 24 heures et 7 jours).

- Les psychromètres. Le principe repose sur le double fait que l'évaporation de l'eau entraîne un abaissement de température et que cette évaporation est d'autant plus abondante que l'air ambiant est plus sec. Ces appareils se composent de deux thermomètres identiques placés l'un à côté de l'autre, l'un étant appelé « thermomètre sec », qui mesure la température ambiante et l'autre « thermomètre mouillé », qui mesure une température inférieure à la température ambiante. La différence entre les deux températures est d'autant plus forte que l'évaporation est abondante et l'air plus sec.

- Les hygromètres à points de rosée. Ce sont des instruments qui permettent de déterminer par lecture directe la température à laquelle l'humidité de l'air devient saturante. Ils sont précieux pour vérifier l'hypothèse d'une condensation superficielle. Il s'agit de refroidir une surface brillante placée au contact de l'air ambiant jusqu'à ce que se forme sur elle de la buée (condensation de la vapeur d'eau de l'air ambiant), montrant que la surface a atteint la température du point de rosée. Le mode de refroidissement est obtenu par évaporation d'éther pour les appareils les plus anciens et à partir de l'effet « thermoélectrique Peltier » pour les appareils les plus récents de ce début des années 80.

- Les hygromètres et thermomètres à fonctionnement électrique. Ce sont de petits appareils de poche comportant une sonde reliée à un boîtier transmetteur. L'humidité est mesurée par un capteur utilisant la variation de capacitance d'un condensateur en couche mince dont le diélectrique est un polymère. La température est mesurée par une résistance de platine à très haute sensibilité. Certains de ces appareils permettent aussi la détermination directe du point de rosée

3 • Mesures in situ de la perméabilité d'une paroi

On peut recourir à cet essai lorsque l'hypothèse d'humidification d'une paroi par infiltration directe de la pluie a été envisagée. L'essai décrit par M. Mamillan (Annales de l'ITBTP, 1966), s'effectue à l'aide d'une chambre plate en Plexiglas fixée au mur à l'aide d'un joint en mastic polymérisant. La surface de pénétration de 16 x 34 cm fait office de réservoir d'eau et est en contact direct avec le mur. Nous avons déjà décrit cet essai dans notre premier chapitre.

L'ensemble du propos développé par Raymond Collombet sera une référence pour de nombreux opérateurs cherchant à s'approprier une méthode de diagnostic de l'humidité ou à en élaborer une qui serait plus spécifique à l'architecture de terre. Nous verrons notamment par la suite l'impact de cette approche sur un propos développé par l'architecte-ingénieur Pascal Odul.

Dans le cadre du colloque international sur le patrimoine européen des architectures de terre s'étant tenu à l'E.N.T.P.E., Lyon, France, en 1987, développant la question de l'humidité dans les constructions en terre et des principaux problèmes pathologiques, **A. Hakimi et A. Acharhabi**, (L.P.E.E.; Maroc), structurent leur exposé autour d'une première partie théorique puis d'une deuxième partie en forme d'étude de cas sur la Médina de Fès, Maroc.

Dans leur première partie théorique, les auteurs s'attachent à passer en revue les différentes « sources d'humidification » des édifices, puis à proposer leur méthode de diagnostic.

A • Les sources d'humidification.

a - les remontées capillaires. Les auteurs rappellent la théorie de la pression capillaire à l'origine d'un phénomène physique ascensionnel de l'eau par les pores, avec l'augmentation de la pression capillaire en fonction de la finesse des pores et donc élévation maximale de l'eau pour les pores les plus fins. Mais au-delà de cette théorie connue, l'application des lois de la capillarité s'opère de façon plus complexe, notamment sur les matériaux de construction poreux. En effet, la hauteur limite d'ascension capillaire dépend de plusieurs facteurs :

- de la dimension et du nombre des pores (porosité volumétrique du matériau) ;
- de la morphologie de la structure poreuse, forme, enchevêtrement, communication des pores entre eux, poches et vides bloquant l'air, transformations chimiques dues aux sels solubles, etc.
- de l'évaporation liée au climat, à l'exposition.

Les auteurs rappellent que malgré les travaux poussés sur l'application des lois de Laplace et de Jurin, avec l'utilisation du porosimètre à mercure, ou par les méthodes de succion, on n'est pas encore en mesure d'établir directement le niveau de la frange de remontée d'eau. Malgré les progrès apportés par l'observation au microscope électronique, beaucoup de facteurs restent encore inconnus. Par ailleurs, les maçonneries ne sont pas homogènes, notamment lorsqu'elles sont constituées de blocs et de joints qui créent une discontinuité du

cheminement capillaire. Ainsi, les essais technologiques en vraie grandeur, basés sur des mesures physiques, sont actuellement, selon ces deux chercheurs marocains, les plus représentatifs des phénomènes. Puis, les auteurs établissent la relation entre la capillarité et la porosité en rappelant que, théoriquement, plus le matériau est poreux, plus l'ascension capillaire est rapide. La porosité représentant le volume des vides par rapport au volume apparent des matériaux. Elle est un facteur essentiel qui régit la capillarité. Mais cette évidence théorique est dans les faits d'analyse du phénomène sur différents matériaux poreux, largement contredite. La taille des pores semble être en effet un facteur plus important que le seul degré de porosité. Par la suite, les auteurs passent en revue les principales causes et manifestations des désordres générés par les remontées capillaires. Rien de nouveau sur cet aspect de la question.

b - Les pénétrations des eaux de pluie, ou problèmes d'infiltration. Les deux auteurs marocains rapportent ce phénomène à deux causes principales :

- la « sévérité » du site et de l'exposition du bâtiment : intensité de la pluie, débit, vitesse, pression et direction du vent. Mais aussi, l'évaporation conditionnée par la température et le degré d'hygrométrie, la vitesse des courants d'air au voisinage des façades, la valeur et le degré d'ensoleillement. Mais encore, le régime climatique saisonnier.

- la mise en œuvre défectueuse, soit des maçonneries, soit des enduits est une des principales causes des infiltrations d'eau. Il peut alors s'agir d'un défaut de montage ou d'exécution des maçonneries tels que joints de mauvaise qualité, fissuration des joints, joints verticaux mal remplis, rejointoiement réalisé en même temps que la pose. Puis la question des enduits avec le défaut d'adhérence, la fissuration de retrait, la mauvaise préparation du support, le surdosage en liant, le faïençage (talochage ou lissage excessif).

- les déficiences des liaisons ossature/maçonnerie relevant d'une mauvaise conception ne prenant pas en compte la dilatation différentielle des matériaux, par exemple.

Les auteurs passent ensuite rapidement en revue les manifestations d'humidité résultant de l'infiltration et relèvent comme beaucoup d'autres auteurs, qu'elles sont parfois difficiles à distinguer de celles résultant de la condensation.

c - La condensation. Les mécanismes en sont décrits, ainsi que les principaux facteurs tels que température et hygrométrie de l'air, importance de la superficie des parois froides (vitres, façades exposées au froid), ventilation des locaux, ponts thermiques. Les manifestations de la condensation sont rappelées et les auteurs relèvent qu'elles sont en général plus évidente en saison froide.

B • Le diagnostic

Le diagnostic « consiste à collecter le plus grand nombre possible de renseignements sur la construction, à examiner les désordres visibles et à procéder à des sondages, des mesures, pour déterminer la répartition de la teneur en eau dans les murs affectés par l'humidité et à en déduire l'origine ou les causes de l'humidification excessive ». Le diagnostic doit s'opérer de la façon suivante :

a - Enquête pour connaître l'histoire, l'environnement du bâti. Connaissance de la date de construction, de l'éventualité de travaux et transformations antérieurs, de la réalisation d'ouvrages étanches faisant barrage à la nappe phréatique, d'un éventuel rehaussement du terrain, de la réalisation de pavements périphériques au bâtiment pouvant bloquer l'évaporation, de l'application d'enduits trop richement dosés, de l'installation de pièces d'eau, d'un

calfeutrement d'aérations destinées à la ventilation, de l'application de remèdes non appropriés sur des murs soumis à des remontées capillaires (peintures étanches, hydrophobants), de sinistres accidentels (inondations, fuites). Il est en effet très important de présenter la nécessité de mener une telle enquête sur le bâtiment mais également sur les bâtiments du voisinage, ce que ne rappellent pas assez tous les auteurs abordant cette question de la pathologie et du diagnostic.

b - Les mesures, essais pour déterminer les origines de l'humidité. Pour les deux chercheurs marocains, cette phase apparaît être la plus importante pour l'établissement du diagnostic. C'est en effet « à partir des résultats des sondages, des mesures qui vont être effectuées, qu'on va pouvoir distinguer la ou les origines réelles de l'humidification ». Rechercher d'abord l'eau où elle est signalée, sur les murs, les plafonds, les sols. Localiser la présence de l'eau. Les auteurs préconisent dans un premier temps l'utilisation d'appareils électriques portatifs, puis de la caméra infrarouge, pour déterminer l'étendue des zones humides. Il s'agit d'un « pré-diagnostic » qui n'intéresse que la surface des maçonneries. Une fois ces zones humides localisées, on peut alors procéder aux mesures en profondeur. Les différentes méthodes présentées sont les suivantes :

- mesures par prélèvement et détermination de la teneur en eau, soit par séchage et pesée, soit par réaction chimique au carbure de calcium. Ces méthodes sont décrites en détail, rien de nouveau ici par rapport à la contribution antérieurement révisée de R. Collombet. Les auteurs précisent que ces deux méthodes permettent de comparer différentes mesures en surface et en profondeur et qu'elles peuvent distinguer entre une humidification par remontée capillaire, infiltration ou condensation, mais que par contre, ces méthodes sont légèrement destructives. Pour eux, la méthode de prélèvement et pesée par séchage donne des résultats plus précis tout en étant moins coûteuse que la méthode au carbure de calcium.

Viennent ensuite différents exemples d'interprétation des résultats de mesure de teneurs en eau présentées sous forme de tableaux commentés, mettant en relation différents paramètres tels que le niveau de prélèvement, le matériau (blocs, joints de mortier ou enduits), la relation entre la surface extérieure et différentes profondeurs de prélèvement, autant de variables qui, mises en relation, permettent de distinguer les phénomènes d'humidification et les principales sources précédemment présentées : les remontées capillaires, l'infiltration, la condensation. Nous sommes là en présence d'une méthode et de modes d'interprétation couramment pratiqués dans le domaine du diagnostic d'humidité et rejoignons encore le propos de R. Collombet. Les auteurs terminent ce chapitre sur le diagnostic en présentant l'essai d'absorption par capillarité du parement, à l'aide de l'essai de la chambre étanche que nous avons déjà répertorié en première partie de notre révision de la littérature.

II.7.3. - Deux tentatives de mise au point d'une méthode de diagnostic plus spécifique aux architectures de terre

Dans le cadre de la conférence internationale « Adobe'90 », l'architecte-ingénieur **Pascal Odul**, présente une méthodologie de diagnostic de la pathologie d'humidité des constructions en terre. L'intérêt de cette communication réside dans la spécificité du propos et constitue alors l'une des premières tentatives de définition d'une méthodologie de diagnostic applicable aux seules constructions en terre en s'appuyant sur une bibliographie de

travaux réalisés par d'autres chercheurs qui ont antérieurement proposé cet angle d'attaque spécifique mais de façon fragmentaire. On retrouve aussi dans la réflexion proposée par P. Odul, des éléments issus de méthodologies de diagnostic des problèmes d'humidité sur les bâtiments anciens en pierres (Collombet, op. cit.). Mais, le propos de P. Odul qui entend être exhaustif en devient parfois complexe. Néanmoins, cette contribution mérite que l'on s'y arrête car elle constitue, à notre sens, une véritable étape nouvelle dans la réflexion.

L'auteur part du principe que « chaque intervention sur le terrain doit être précédée par une compréhension des phénomènes de dégradation : symptômes, causes, origine des causes. Ceci nécessite une approche méthodologique clairement explicitée dès le départ et qui guidera le type d'intervention à envisager ». Cette méthodologie devrait permettre de guider les interventions dans le cadre d'une connaissance globale prenant en compte les limites et les potentiels du matériau terre, au lieu de « blinder » le matériau, par méconnaissance de ces limites et de ces potentiels. Ainsi, l'auteur présente une série de quatre hypothèses d'intervention :

- a - Comprendre les effets et les causes des désordres ;
- b - Remédier aux causes des désordres ;
- c - Faire une inspection et un entretien régulier ;
- d - suivre l'efficacité de l'intervention.

P. Odul propose des grilles de réflexion, sous forme de tableaux, qui correspondent à différentes séquences du diagnostic :

- a - la caractérisation des matériaux de construction concernés par les pathologies ;
- b - les symptômes de la pathologie d'humidité ;
- c - les causes de la pathologie ;
- d - les possibles origines des causes.

La méthodologie de diagnostic proposée passe par différentes étapes :

- a - Le constat et la mesure des symptômes de pathologie : le relevé des conditions ;
- b - le suivi de l'évolution des symptômes : « monitoring » ;
- c - l'interprétation des constats et des mesures ;
- d - la recherche des causes ;
- e - la recherche de l'origine des causes ;
- f - l'évaluation des symptômes.

Pour ce qui est des symptômes, P. Odul distingue huit catégories :

- . l'érosion ;
- . la décomposition du matériau ;
- . les fissures ;
- . l'humidité ;
- . les taches ;
- . les parasites ;
- . la défaillance de la protection de surface extérieure ;
- . la défaillance des finitions et des protections de surface intérieures.

Pour ce qui est de la recherche des causes, l'auteur distingue deux grandes familles de causes :

- . l'eau, qui peut agir par impact, ruissellement, infiltration, l'eau de construction ; l'absorption capillaire.
- . la vapeur d'eau/humidité relative/température/taux de ventilation.

Pour ce qui est de la recherche de l'origine des causes, P. Odul distingue trois niveaux :

- . les origines extérieures avec sept niveaux : l'eau elle-même, l'air, la température/humidité relative/perméabilité à la vapeur, les sels solubles, les pathologies de structure, la biodégradation, les activités humaines.
- . les origines inhérentes au bâtiment avec 2 niveaux : la matière première, la mise en œuvre.
- . les origines inhérentes à l'utilisation, avec trois niveaux : le mode de vie, les transformations, l'entretien.

Vient ensuite le diagnostic qui est mené en quatre phases :

1 - la mesure des symptômes :

le constat et/ou la surveillance (« monitoring »). Il s'agit essentiellement de quantifier la teneur en eau des matériaux en application de différentes méthodes et équipements adaptés pour des essais destructifs ou non destructifs. Dans cette phase vient aussi la mesure de vapeur d'eau/humidité relative/température/taux de ventilation, avec, la aussi des essais destructifs ou non destructifs utilisant divers types d'équipements : torche thermoélectrique, thermomètre infrarouge optique, condensatest, hygromètre électronique, hygrographe, psychromètre, thermomètre à alcool, thermomètre infrarouge, thermo-hygromètre. Ainsi que les tests *in situ* visant à analyser les sels solubles l'auteur donnant l'exemple du nitritest.

2 - Les mesures complémentaires :

le contrôle de la localisation des canalisations, le contrôle de l'écoulement des canalisations d'évacuation et d'adduction, l'humidité dans le sol, le contrôle du taux de ventilation, les mesures quantitatives et qualitatives des sels, l'acidité, l'absorption capillaire des matériaux, l'hygroscopicité.

3 - l'évaluation des mesures :

P. Odul rappelle toute la difficulté de l'interprétation entre les manifestations d'humidité dues à l'infiltration de la pluie, l'absorption capillaire ou la condensation du fait de l'éventail des facteurs qui doivent être pris en compte.

4 - L'évaluation des symptômes :

L'auteur souligne l'importance qu'il convient d'accorder à une distinction entre les différents types de désordre car ceux-ci dicteront les interventions à envisager. Il convient alors de distinguer trois niveaux de désordres :

- . les désordres mettant en cause le maintien du bâtiment ;
- . les désordres sans conséquences pour le maintien du bâtiment ;
- . les désordres mettant en cause le maintien des particularités spécifiques pour la valeur culturelle ou historique du bâtiment.

P.Odul conclut sur le fait que l'analyse qu'il propose a permis d'identifier trois lacunes majeures (vraisemblablement chez les opérateurs analysant les problèmes d'humidité), pour l'aboutissement d'une approche cohérente de diagnostic de la pathologie d'humidité des constructions en terre :

- a - le manque de bases solides permettant l'interprétation des mesures dans la phase du diagnostic ;

- b - le manque de bases solides permettant l'évaluation de la gravité des symptômes également dans la phase du diagnostic ;
- c - le manque de suivi et d'évaluation systématique des interventions techniques et la diffusion des résultats permettant aussi de vérifier la validité du diagnostic.

*Une autre contribution ultérieure sur cette question des méthodes de diagnostic propre aux architectures de terre, bien que l'on doive encore la considérer comme incomplète, mérite d'être relevée. Dans le cadre de sa formation spécialisée du CEEA-Terre du CRATerre-EAG, **Béatriz Helena Ramirez**, architecte-conservateur de nationalité colombienne, soutenait son mémoire de diplôme en 1992 sur la question de « la pathologie des anciennes constructions en terre » et du « diagnostic ». Le travail proposé est intéressant car il prolonge le propos spécifique engagé par P. Odul, selon un angle d'attaque relativement complet en cernant de façon assez claire et distincte les pathologies de structure d'une part, et les pathologies d'humidité d'autre part. La contribution qui entend surtout s'interroger sur une méthode de diagnostic prend mieux en compte les aspects de structure qui avaient été peu abordés jusqu'alors. Ce travail marque une étape dans l'évolution de la réflexion sur le diagnostic et introduit une approche plus méthodique en tentant de définir des outils ou une forme de guide d'analyse diagnostic.*

On remarquera que le travail proposé par B.H. Ramirez, présente une logique contestable dans la présentation de la séquence méthodologique en évoquant la question de l'origine des pathologies, et donc de la recherche des causes, avant d'exposer la phénoménologie et la symptomatologie, c'est à dire avant de rendre compte des manifestations de la pathologie. Ce travers de logique conduit l'auteur à ne développer qu'un propos réducteur sur les causes et leurs origines, et à s'étendre bien davantage sur les manifestations, ce qui, on peut l'accorder est plus aisé. On constate donc une fois encore la difficulté à entrer de façon plus complète dans le propos analytique qui est véritablement celui du diagnostic, au delà du seul relevé des conditions. Avec tout ce que cela suppose de rester sur une position trop généraliste, et surtout de laisser trop de latitude à l'interprétation insuffisamment fondée sur la description la plus complète possible des manifestations. Mais aussi sur l'élimination progressive des hypothèses d'investigation permettant in fine d'élucider les causes puis leurs origines. Mais dans le cas présent, c'est plutôt une difficulté à dépasser le descriptif pour aborder l'analytique qui est trop délaissé par l'auteur. Il faut alors convenir que, au-delà de la méthode et de la théorie, l'expérience peut faire la différence.

Néanmoins, au-delà de ce constat d'une logique d'exposé méthodologique contestable, le travail de B.H. Ramirez constitue une référence intéressante, particulièrement pour l'expression théorique autant que visuelle (croquis, photographies) des manifestations de la pathologie structurale et d'humidité. Il y a dans ce travail une véritable tentative de description rigoureuse de la typologie des manifestations pathologiques, qui montre clairement au lecteur que telle manifestation peut être vraisemblablement associée à telle ou telle cause « typique », ou que telle manifestation peut renvoyer à un plus haut niveau de complexité de compréhension et donc d'investigation. L'expression de la typologie des fissures, dans l'exposé des manifestations de la pathologie structurale, semble être très complet et permet de s'arrêter sur une claire distinction entre des « fissures superficielles » (retrait hydraulique, retrait thermique, gonflement), des fissures « structurales » dues au comportement du sol, en distinguant trois familles typologiques de fissures : celles de « translation verticale » (tassements), celles de « translation horizontale » (glissements), et celles de « rotation » (aux liaisons structurales). L'auteur s'efforce par la suite de

traiter de façon distincte la question des désordres visibles dans les façades et notamment de la relation entre le plein (le mur) et les vides (les ouvertures). Puis la question des désordres dans les murs de refend, dans les planchers et enfin dans les toitures. On aura bien compris la séquence de description des manifestations qui part des fondations pour aller jusqu'à la toiture.

Dans l'exposé des manifestations de la pathologie d'humidité, nous retrouvons les trois phénomènes typiques que sont les remontées capillaires, les infiltrations et les condensations qui ont déjà retenu l'intérêt de l'ensemble des auteurs ayant abordé antérieurement cette question du diagnostic de l'humidité. Mais là encore, au-delà d'une définition de ces principales manifestations de l'humidité, l'expression des causes et des origines de la pathologie d'humidité précède l'exposé des manifestations, reprenant la même logique contestable que pour l'exposé sur la pathologie structurale. L'auteur distingue alors quatre niveaux possibles de causes : l'emplacement du bâtiment, les défauts inhérents à la construction et à la conception, les causes accidentelles et, l'action de l'homme.

Ce qui nous semble être le plus intéressant à relever dans le travail de B.H. Ramirez, c'est le chapitre consacré au diagnostic en proposant une méthodologie d'observation des désordres pouvant faciliter la formulation du diagnostic des causes. L'auteur propose alors une façon d'élaborer les croquis de relevé de l'état, sous toutes leurs formes, partant du principe que les allers et retours entre l'observation et les croquis permettent de formuler les hypothèses d'observation qui seront à la base du diagnostic. Cette observation armée de croquis passe par la séquence suivante qui est traditionnellement celle du « relevé architectural » qui rend compte des manifestations des pathologies, avec la séquence graphique suivante :

- a - étude de l'implantation du bâtiment sur le terrain : situation de la parcelle, voirie, îlot, etc.; accès au terrain, limites du terrain, implantation de la construction sur le terrain, orientations du bâtiment, alignement ou retrait par rapport à la voirie et aux autres constructions, mitoyennetés, épaisseur des corps de bâtiment, type de terrain (perméabilité, stabilité, morphologie), paysage environnant, climatologie du lieu.
- b - croquis des façades, rapport entre pleins et vides, ordonnancement des baies, disposition des étages, nombres de travées verticales, évidence des matériaux, repérage des manifestations pathologiques en distinguant les désordres de structure et d'humidité.
- c - plans des différents niveaux, implantation des murs différenciés, matériaux composant les murs, position des baies, repérage des piliers et poteaux, colonnes, etc., repérage des installations d'eau et de toutes les manifestations pathologiques pouvant être transcrites sur les plans.
- d - composition des planchers et des plafonds, repérage des intervalles structuraux (pignons, murs de refend et mitoyens, cage d'escalier, etc., sens de portée des planchers, identification du rôle structurel des murs, des systèmes constructifs, des matériaux.
- e - plan de toiture, en indiquant les éléments distincts de composition (faîtage, noues, arêtières, lucarnes, etc.), correspondance de la toiture avec la charpente, avec les murs porteurs, etc., matériaux.
- f - coupes longitudinales et transversales avec variation d'épaisseur des murs, présence des supports verticaux, positionnement des planchers et plafonds, positionnement des baies, report de certains ouvrages de second œuvre comme gouttières et descentes d'eau, position des équipements sanitaires, etc.

Le travail proposé par B.H. Ramirez, se termine sur la présentation d'un ensemble de fiches de diagnostic couvrant les pathologies de structure et les pathologies d'humidité. Ces fiches représentent une tentative de synthèse graphique intéressante mettant en relation les paramètres suivants (de gauche à droite en lecture horizontale) :

- a - des croquis ou des photographies (contacts) rendant compte de manifestations pathologiques ;
- b - une description écrite des manifestations précédemment illustrées ;
- c - les causes (on aurait préféré les « hypothèses ») ;
- d - des observations écrites qui semblent être plus des « hypothèses » (on aurait alors inversé l'ordre logique de présentation de ces deux derniers aspects) ;
- e - une brève analyse renvoyant à l'impact possible des désordres sur le bâtiment en précisant le degré de gravité de la situation ;
- f - un bref énoncé des mesures à prendre.

On constate donc que ce travail, même s'il s'est donné l'objectif de développer un propos spécifique sur la pathologie des constructions en terre, et sur le diagnostic, présente encore des niveaux de confusion méthodologique. Les principaux manques sont peut-être le manque d'intérêt accordé à l'environnement qu'a pu relever un P. Delcambre (1987, op. cit.) ou d'autres auteurs que nous avons précédemment cité (K. Van Balen, Th. Joffroy et S. Moriset). Les confusions sont évidentes pour ce qui est de l'analyse-diagnostic en mélangeant les niveaux des hypothèses et des causes, ainsi que de l'origine « possible » ou « évidente » des causes. Par contre sur l'aspect descriptif des manifestations des pathologies, le travail présente un réel intérêt. Ainsi, ces apports comme ces lacunes, et ces confusions, permettent de relever la tentative d'une réflexion méthodologique plus poussée et plus « rigoureuse ».

II.7.4. - La méthode de diagnostic la plus récemment aboutie

*Nous terminerons ce chapitre consacré à l'évolution des méthodes de diagnostic, en nous référant aux plus récentes tentatives de mise au point et d'amélioration d'un propos spécifique sur les architectures de terre, qui ont notoirement bénéficié d'expériences pédagogiques internationales successives. En effet, dans le cadre des enseignements du cours « PAT 96 » (Chan Chan - Trujillo, Pérou), **Anthony Crosby** (National Park Service, Denver, Colorado, USA), a proposé une série d'interventions couvrant la question des pathologies d'humidité et de structure, puis de diagnostic. Tel qu'il est conçu, le cours constitue une nouvelle étape de structuration méthodologique. L'intérêt de cette proposition réside dans sa valeur « pédagogique » et dans le fait que c'est, à notre sens, ce que nous avons repéré de plus clair sur cette question dans l'ensemble de la littérature, au moins pour l'aspect « technique » de la question. On relèvera néanmoins que la distinction entre ce qui relève du niveau de la « macro » pathologie et du niveau de la « micro » pathologie n'est pas encore suffisamment bien établie. Mais, les prochains cours internationaux sur la conservation et la gestion du patrimoine architectural en terre qui seront réalisés dans les cadre des développements du « Projet TERRA » (ICCROM/GCI/CRATerre-EAG), permettront encore d'avancer sur ce chapitre essentiel qui retient tout l'intérêt des chercheurs et des pédagogues.*

En introduction à la pathologie d'humidité, on aura relevé tout l'intérêt de poser en préalable la nécessaire connaissance du comportement du matériau terre par une révision générale de ces principales propriétés et caractéristiques. Puis, le rappel des principaux agents de dégradation du matériau tels que l'érosion, l'absorption, la condensation, les efforts dynamiques et statiques, en

répertoriant pour chacun d'entre eux les effets et les conséquences. Cette approche permet alors assez logiquement d'introduire la compréhension des mécanismes, effets et symptômes typiques, pour un éventail de « désordres typiques », d'ordre général, et pour une succession de « systèmes de construction » : fondations-mur, mur-ouvertures, plancher-mur, mur-toiture. Au-delà de cette approche compréhensive du matériau et de la « mécanique » pathologique, il est alors possible d'entrer plus à fond dans la question de la dégradation due à l'eau et à l'humidité en énumérant les actions de dégradation ainsi que leurs manifestations typiques. On aura bien compris ici que le propos s'en tient principalement à un « constat », ce qui est bien la première phase d'observation nécessaire pour fonder la rigueur d'un diagnostic.

La méthode adoptée pour le constat de la pathologie d'humidité est reprise ensuite pour établir le constat de la pathologie structurale. Tout d'abord, une introduction au comportement des structures construites en terre, suivie d'une description des symptômes et désordres typiques de la pathologie structurale. Puis l'exposé des principaux systèmes de construction affectés par les désordres typiques en reprenant la séquence proposée pour la pathologie d'humidité. Enfin, une introduction à la mise en relation aux principales causes connues des désordres sans pour autant glisser vers l'interprétation, c'est à dire vers l'analyse qui relève de la phase ultérieure du diagnostic.

La question du diagnostic est mise dans une perspective méthodologique plus large, à savoir la relation entre la « prospection des conditions » ou le « relevé de l'état », l'analyse, et le diagnostic lui-même qui fondera les orientations à donner aux interventions. Ainsi, A. Crosby peut introduire la méthodologie de cette prospection, sa logique séquentielle permettant de constater, d'observer, de rendre compte, pas à pas, des manifestations et des symptômes, et de relier l'évidence des désordres aux hypothèses d'interprétation, puis à l'analyse. Ce cheminement d'investigation méthodique et rigoureux fonde alors la possibilité de passer à la recherche des causes et de leurs origines, autant pour la pathologie d'humidité que structurale en distinguant les causes et leurs origines « extérieures », des causes et origines « inhérentes à la construction », puis des causes et origines « inhérentes à l'usage » de la construction. Cela permet de passer en revue l'ensemble des hypothèses d'interprétation et de pouvoir cerner les problèmes par élimination successive. Au-delà de ce stade il est possible de recourir à des mesures complémentaires, de façon à vérifier les hypothèses encore sujettes à des doutes ou même pour confirmer les hypothèses les plus crédibles.

La méthodologie proposée par A. Crosby ne s'en tient pas au seul plan « technique » et intègre la plus vaste dimension de l'étude et de l'analyse de « l'environnement », c'est à dire de l'observation de l'édifice dans son milieu ambiant. On pourra constater alors que l'approche du milieu s'en tient principalement à des considérations sur le milieu « physique » et que la méthode pourrait être enrichie, complétée, par une approche du milieu « socio-économique » comme ont pu le suggérer P. Delcambre de l'ANAH (France, 1987), ou K. Van Balen (Belgique, 1990), ou Th. Joffroy et S. Moriset (1996). On relèvera aussi toute l'importance que A. Crosby accorde à la compréhension du « système d'équilibre original » de l'édifice et de la vérification des perturbations causées à cet équilibre au cours du temps. Enfin, la méthodologie ne serait pas complète si l'on n'abordait pas la question de l'évaluation systématique des symptômes et de l'état, en révisant à nouveau la prospection des conditions, et surtout en se donnant le temps nécessaire du « monitoring » de l'évolution de ces symptômes et de ces conditions. La démarche est alors rigoureusement fondée sur l'ensemble de la séquence de prospection des conditions, sur les

niveaux successifs d'observation des manifestations, d'évaluation et d'interprétation des hypothèses, d'évaluation et interprétation des mesures, du « monitoring » des symptômes, conduisant à l'énoncé « scientifique » des causes et de leurs origines et donc, au « diagnostic ». C'est sur cette base rigoureuse que pourra être préparé le projet d'intervention établi sur un ensemble de recommandations d'intervention présentées par niveaux de priorités, sur le court, le moyen et le long terme, en distinguant les interventions urgentes, le programme d'entretien et les interventions plus « lourdes » qui devront être fondées sur une étude plus poussée, en précisant le chronogramme, les coûts et le planning des interventions.

II.8. - La question spécifique des pathologies sismiques et du diagnostic

Il nous a semblé nécessaire de traiter séparément le propos sur la pathologie sismique et le diagnostic de l'état des édifices en terre affectés par les séismes. En effet, la question est déjà très importante, en soi, et fait l'objet par ailleurs, de recherches tout à fait spécifiques, depuis ces quinze dernières années. Plusieurs pays qui ont pu être affectés par ce risque et qui le demeurent, ont apporté des contributions essentielles. Tel est le cas de la Turquie pour une époque plus ancienne et plus récemment du Pérou, des USA et de l'Italie. Les recherches menées par l'Université Catholique de Lima, au Laboratoire d'Ingénierie Sismique (J. Vargas-Neumann et alii) ont été répercutées sur le milieu scientifique, par des colloques internationaux, mais aussi dans le domaine concret de l'expérimentation par des programmes visant à tester la résistance des structures exposées aux secousses sismiques simulées, sur table vibrante. Ces programmes ont d'ores et déjà eu des répercussions sur l'expérimentation de systèmes de construction « résistants aux séismes » (maçonnerie d'adobe renforcée, systèmes de construction mixtes avec solutions d'étages en ossature bois et torchis, (cf. **J.L. De Olarte et E. Guzmán**, 1993, in recueil de communications de la conférence Terra'93, Portugal et autres recherches communiquées par l'exposition « Habiterra », 1995). Mais, plus récemment, le séisme de Northridge, en Californie (1994), permettait un renforcement des recherches précédemment engagées par les chercheurs nord-américains, notamment dans le cadre d'un programme soutenu par le GCI, **le programme « GSAP »** ou « Getty Seismic Adobe Project ». Du côté italien, les chercheurs du Centre Universitaire pour les Biens Culturels de Ravello, s'interrogent depuis ces dernières années sur la « récupération critique » des « cultures antisismique traditionnelles » sans pour autant négliger les apports fondamentaux, et complémentaires, de l'ingénierie sismique. Nous rendrons compte de ces recherches qui nous paraissent essentielles aujourd'hui alors que les chercheurs et les praticiens s'interrogent sur les voies à adopter pour optimiser la réponse parasismique des édifices, au carrefour de l'ingénierie « dure » prônant le renforcement des structures, de la recherche culturelle investissant la mémoire des bâtisseurs anciens et leurs savoir-faire, ou de la « réhabilitation sismique rétroactive » travaillant fondamentalement sur la « stabilité » des édifices.

II.8.1. - Résistance des matériaux

Dans le cadre du colloque international de Bruxelles (1984), **J. Vargas-Neumann, J. Bariola, M. Blondet et P.K. Metha**, chercheurs du laboratoire d'ingénierie sismique de l'Université Catholique de Lima Pérou, ont présenté une communication sur « la résistance sismique de la maçonnerie d'adobe ».

Cette communication rend compte d'un projet de recherche sur « les bâtiments en terre en zones sismiques » développé en 1983. Il s'agissait de caractériser les sols utilisés du point de vue de la résistance des maçonneries, d'étudier l'effet d'adjuvants naturels, et d'identifier les sols les plus adéquats pour construire en adobe, afin d'informer les bâtisseurs potentiels. Cette communication présente également des éléments de diagnostic sur les « facteurs permettant de contrôler la résistance des maçonneries en adobe », qui justifient sa prise en compte dans ce chapitre de notre revue de la littérature. Ces facteurs relevés par les auteurs sont les suivants :

1 - Les propriétés du matériau : ce sont les caractéristiques du processus de retrait au séchage et/ou de résistance à l'état sec qui sont les plus influentes sur la résistance des maçonneries en adobe. Aucune corrélation n'a pu être démontrée entre la composition chimique de la terre ou de l'eau et cette résistance des maçonneries. Par contre, les analyses par diffraction aux rayons X des propriétés minéralogiques tendent à montrer que ce n'est pas tant le type de minéraux argileux qui agit sur la résistance mais la quantité d'argile contenue dans le sol. Plus les sols sont argileux, plus ils présentent une résistance à sec élevée. Mais cependant les maçonneries d'adobe construites avec ce type de sols argileux présentent de faibles résistances notamment à cause du retrait au séchage (fissurations). Les tests de résistance en compression diagonale effectués par le laboratoire, le démontrent. Toutefois, l'argile est fondamentale pour la construction en adobe car elle donne aussi au matériau de la résistance à sec et plus encore sa cohésion et sa plasticité. Aucune relation de caractère définitif n'a pu être démontrée quant au rôle joué par les limons et les sables mais la fraction grossière joue un rôle certain en limitant le retrait au séchage et donc la fissuration. En testant la consistance standard du mortier (son ouvrabilité), les chercheurs ont pu observer qu'une maçonnerie plus résistante requiert moins d'eau que n'en demande cette consistance standard. Ce paramètre permettant d'évaluer la plasticité du sol, et aussi à mesurer l'adhérence du mortier et de la brique d'adobe, confirme une bonne corrélation avec la capacité à contrôler le retrait au séchage, conditionné par la quantité de matériau grossier (fraction sableuse). Par contre les limites d'Atterberg ne sont pas directement utiles comme indicateurs de la résistance des maçonneries d'adobe.

2 - Processus de séchage : l'une des plus importantes conclusions de cette recherche est tirée de l'analyse du degré de microfissuration résultant du séchage, en mesure volumétrique, facteur très influent sur la résistance des maçonneries en adobe. Ainsi, il est essentiel de garantir l'intégrité du système brique-mortier en éliminant au maximum le risque de fissuration du mortier. Une corrélation a pu être établie entre le taux de séchage et le degré de microfissuration résultant du retrait, notamment entre le séchage ombragé des briques et le séchage au soleil du mortier. Le processus de séchage du mortier de construction des briques d'adobe s'opère en deux stades bien définis. La plupart des microfissures apparaissent rapidement au cours d'un premier stade d'absorption de l'eau du mortier par les briques. Le deuxième stade est beaucoup plus lent et la perte d'eau résulte davantage de l'évaporation. Ce résultat confirme que toute méthode qui permettrait de réduire le taux de transfert de l'eau entre le mortier et les briques serait bénéficiaire à la résistance de la maçonnerie.

3 - Les effets des adjuvants : d'une manière générale l'ajout d'agents de cimentation à la terre n'est pas très efficace pour augmenter la résistance des maçonneries d'adobe. L'ajout de chaux réduit cette résistance alors que l'ajout de ciment à un taux supérieur à 10 %, combiné avec l'augmentation de la

fraction sableuse du sol augmente la résistance. De faibles quantités de carbonate de sodium, agent de dispersion, contribuent à une amélioration de la résistance en compression des adobes. L'ajout de végétal (paille) accroît la résistance des maçonneries d'adobe car les fibres contribuent à réduire considérablement le développement des microfissures dans le mortier. Mais de trop grandes quantités de paille réduisent la résistance du fait de l'augmentation de composants organiques.

4 - Le processus de construction : la qualité de la main d'œuvre réalisant la maçonnerie d'adobe joue un très grand rôle pour garantir la solidité des maçonneries d'adobe. Cette solidité testée en compression diagonale sur différents niveaux de qualité d'exécution peut être augmentée du simple au double. De même lorsque l'on prend la précaution de mouiller les adobes avant de les bâtir avec le mortier de pose. Cela améliore la qualité du système brique-mortier et réduit les microfissures. Des mortiers plus secs mais présentant une bonne ouvrabilité sont aussi plus avantageux car ils opèrent moins de retrait. Il a été également prouvé que si les briques d'adobe peuvent être manipulées après une semaine de cure de séchage, il est nécessaire d'attendre au moins deux semaines pour garantir une stabilité de la maçonnerie. De même, le fait de laisser « dormir » la terre pendant un ou deux jours, avant de l'utiliser, permet une meilleure dispersion de l'eau et une action plus uniforme de la fraction argileuse.

En conclusions de leur communication, Julio Vargas-Neumann et al. relèvent trois points importants :

- 1 - Si l'argile est le composant le plus important d'une terre pour bâtir en adobe, car il donne de la résistance à sec, elle est aussi dangereuse car elle est à l'origine d'un retrait au séchage.
- 2 - Pour garantir une maçonnerie d'adobe de qualité et résistante, il est indispensable de bien contrôler le processus de retrait au séchage.
- 3 - L'ajout de paille dans une certaine quantité contrôlée, tout en conservant une bonne ouvrabilité du mortier, combiné à l'ajout de sable grossier, permet de bien contrôler ce risque de microfissuration et en conséquence améliore considérablement la résistance des maçonneries d'adobe.

A partir de différents échantillons de mélanges de terre, paille et sable grossier, des tests d'observation de la résistance à sec et du processus de microfissuration doivent être réalisés en laissant sécher des échantillons pendant au moins 48 heures. Il est apparu que les échantillons les plus pauvres en sable grossier fissuraient davantage. Enfin, durant le processus de construction, il convient de veiller à tremper les adobes pendant 10 à 15 minutes sur chacune de leurs faces horizontales. Cette recommandation ne peut pas s'appliquer pour des adobes trop sableuses. D'autres recommandations d'ordre général invitent à utiliser des sols propres et débarrassés de matériaux inutiles (composants organiques, trop grosses pierres), à bien mélanger le mortier avant de mouler les briques ou de l'utiliser pour la pose, de façon à ce qu'il soit bien homogène et ouvrable, à faire sécher les briques d'adobe à l'ombre, à bien nettoyer les briques avant de les utiliser, à bien bourrer les joints verticaux et horizontaux et à contrôler le bon aplomb de la maçonnerie.

II.8.2. - Résistance des maçonneries en adobe, pisé et torchis

Les travaux ultérieurs de **J. Vargas-Neumann**, ont visé à explorer la résistance sismique de maçonneries en pisé, en corrélant les résultats avec ceux obtenus sur les maçonneries d'adobe. Ces travaux étaient publiés lors de la Conférence « Terra'93 », Portugal.

Les paramètres alors testés sur le pisé étaient les suivants :

- la granulométrie de la terre ;
- la teneur en eau ;
- le degré de compactage ;
- l'emploi d'adjuvants naturels ;
- le traitement des joints entre banchées.

Ces paramètres ont été testés sur 87 essais en compression diagonale appliquée sur des échantillons de pisé. Les résultats ont été ensuite vérifiés sur des murs-tests en pisé par des tests quasi-statique horizontaux.

a - Influence de la granulométrie : l'importance de la fraction argileuse agit sur le retrait au séchage avec une fissuration qui doit être contrôlée par ajout de paille ou de sable grossier. La résistance en compression sèche augmente avec l'importance de la fraction sableuse. Mais, la résistance au cisaillement s'en trouve réduite et plus la fraction sableuse est élevée, plus le matériau est exposé à l'érosion.

b - Influence de la teneur en eau : pour un même degré de compactage mais pour des teneurs en eau qui vont en augmentant, sur des sols peu argileux, la résistance sismique s'en trouve améliorée. Mais à un seuil maximum de teneur en eau de 17 %, le compactage devient plus difficile et la fissuration de retrait au séchage est notoire dès les premières 24 heures de cure du pisé.

c - Influence du compactage : pour une même teneur en eau, l'augmentation du degré de compactage accroît la densité et la résistance à sec, jusqu'à un certain degré de compactage optimal. Ainsi, la résistance sismique maximale peut être corrélée à un taux maximum d'humidité « permmissible ». Mais le degré d'humidité est plus influent que le degré de compactage.

d - Influence des adjuvants naturels : l'ajout de sable (de 50 % à 200 % en volume) à des sols argileux contribue à un meilleur contrôle de la fissuration de retrait au séchage mais réduit la résistance sismique. Les pisés « sableux » ne peuvent être compactés jusqu'à un degré maximal d'humidité de l'ordre de 15 %, au-delà duquel ils se déforment au décoffrage. L'ajout de paille (de 0,25 % à 2 % en poids) permet aussi de contrôler le retrait et la fissuration et le taux d'humidité peut être supérieur, jusqu'à 20 %, sans les effets négatifs mentionnés par avant. La résistance sismique n'est pas modifiée en dessous d'un ajout de paille à hauteur de 0,5 % en poids. Au-delà, la résistance sismique s'en trouve réduite à cause d'effets secondaires sur le compactage. L'ajout de gravier à la terre (30 % en volume) a été également testé et a démontré son inefficacité sur la résistance sismique.

e - Influence du type de joints : Ce sont les joints « naturels », entre les banchées de pisé, sans autre matériau (paille ou pierre comme cela existe traditionnellement au Pérou), qui donnent les meilleurs résultats pour la résistance sismique. L'ajout d'autres matériaux dans ces joints peut réduire la résistance sismique de 30 %.

D'autres tests en compression diagonale ont été réalisés sur 8 murs-tests en vraie grandeur (2 m x 2 m x 0,20 m), avec des pisés stabilisés à la paille (0,25 % en poids), ou modifiés par ajout de sable et pour différents traitements des joints entre les banchées, avec interposition de pierres, ou avec des renforcements horizontaux et verticaux en cannes de roseaux. Des fissures verticales et horizontales sont apparues au séchage, au droit des renforcements en cannes mais sans influence sur la résistance sismique des murs. Mais c'est le mur en terre seule, avec juste un ajout d'eau entre les terres compactées, qui a prouvé sa meilleure capacité de résistance aux forces sismiques coplanaires et en compression diagonale. Le pisé « naturel » résiste 40 % de plus en moyenne que tous les autres murs, avec une résistance supérieure de 30 % pour les pisés ajoutés de pierres et une résistance supérieure de 100 % pour les pisés renforcés par des cannes de roseaux entre les joints horizontaux des banchées. Mais, la présence d'un treillis de cannes de roseaux empêche le pisé de s'effriter.

Enfin, ces recherches de J Vargas-Neuman sur la résistance sismique du pisé, comparées à celles antérieurement réalisées sur les maçonneries en adobe (1984), montrent que le pisé est plus résistant de 40 %, en moyenne, que les maçonneries en adobe. Par ailleurs, le pisé encaisse beaucoup mieux les déformations, de 3 à 4 fois plus que l'adobe.

Lors de l'exposition Habiter terra sur le thème de la construction en terre Ibéro-américaine, le point a pu être fait sur d'autres recherches menées par le Laboratoire des Structures de l'Université Catholique Pontificale de Lima, concernant la résistance sismique des constructions en terre. Trois programmes menés sur la résistance des constructions en adobe, en pisé, et en torchis, ont retenu notre attention.

Gianfranco Ottazzi et Gladys VillaGarcia, (1995), évoquent des essais dynamiques de simulation sismique sur 8 modules échelle grandeur d'habitat en adobe, tous identiques en dimensions, couverts d'une toiture plate à poutres en bois d'eucalyptus recouvertes de « *caña* » (bambou) puis enduite de terre. Quelques uns de ces modules ont été renforcés par l'inclusion d'une maille de « *caña* » dans l'épaisseur des murs (éléments verticaux et horizontaux). Certains de ces modules ont également reçu en couronnement de leurs murs, un chaînage en bois d'eucalyptus constitué de deux rondins solidarisés en leurs angles par recouvrement et parfois consolidés par des équerres d'angles, également en bois d'eucalyptus. Commentant sommairement les résultats des essais, les auteurs confirment que les modules renforcés par la maille de « *caña* » et par le chaînage en bois, ont beaucoup mieux résisté que ceux non renforcés. L'un des modules qui n'a été renforcé que verticalement dans l'épaisseur de ses murs, s'est effondré en ayant subi un mouvement modéré, confirmant ainsi le rôle des renforcements horizontaux. On aura aussi noté que les auteurs insistent sur l'importance de la qualité des matériaux de construction et de leur mise en œuvre, pour compléter l'efficacité de ces dispositions de renforcement parasismique.

Angel San Bartolomé, (1995) évoque un autre programme d'essais dynamique de simulation sismique sur un module en pisé renforcé construit à l'échelle 3/4. Le module est renforcé dans l'épaisseur de ses murs par des baguettes d'eucalyptus et chaîné par un couronnement de béton armé par deux nappes de bambous. Mais le renforcement intérieur du pisé n'a pu être que minimum car la présence des baguettes d'eucalyptus gêne le compactage de la terre. Il s'agit d'une terre de type argileuse amendée en sable (1:5) et de 15 % de paille en poids. Chaque assise supérieure de couche de pisé a été striée et humidifiée

pour améliorer la résistance au cisaillement-friction. Des fissures sont apparues au séchage entre les joints de banchées et là où étaient inclus les renforcements verticaux. Elles ont été rebouchées en terre stabilisée au ciment. Le module a subi 4 phases de mouvement, faible, modéré, sévère et très sévère. Deux des murs, A et B, ont été sujets à des efforts de flexion par application de charges perpendiculaires à leurs plans, alors que les deux autres murs, C et D, ont été sujets à des efforts de cisaillement. Les fissures ne sont apparues qu'à la phase 3 (séisme sévère), dans les murs de coupe et dans les zones des fissures rebouchées. En phase 4 (séisme très sévère), des fissures plus importantes se sont développées dans les murs de coupe ainsi que dans la partie centrale du mur B qui se sont prolongées dans le chaînage. Mais son armature horizontale de bambou ne s'est pas cassée. Les cadres de portes et de fenêtres fixés dans les murs en pisé par des taquets en bois insérés dans le pisé, sont restés en bon état. Bien que le module puisse être considéré comme irréparable, il ne s'est pas effondré et les murs en pisé ne se sont pas désagrégés. Le chaînage a joué son rôle de diaphragme relativement rigide et tout en améliorant la liaison entre les murs orthogonaux aux angles, il a contribué à réduire les déplacements des efforts de flexion issus de l'application des charges orthogonales à son plan. Le chaînage a aussi permis un ancrage des renforcements verticaux placés dans l'épaisseur des murs en pisé. La fondation en béton cyclopéen et cet ancrage mécanique des renforcements verticaux (en bas et en haut) a présenté un bon comportement sismique. Il n'y a pas eu de déversement des murs ni des déplacements à l'interface des murs et de la fondation. Le renforcement vertical a contribué à absorber les efforts de flexion et à maintenir la liaison mécanique entre les banchées de pisé, améliorant la résistance en cisaillement-friction entre ces banchées de pisé et s'opposant à une vibration désordonnée. Le renforcement horizontal a aussi amélioré la liaison aux angles des murs orthogonaux et a contribué à réduire l'ouverture des fissures des murs de coupe.

Daniel Torrealba (1995), rapporte un dernier essai réalisé entre les années 1985 et 1988, sur un prototype en torchis de deux niveaux. La technique de construction est améliorée par l'utilisation de panneaux préfabriqués (cadre en planches clouées où sont insérés des baguettes de « *caña* » devant recevoir le torchis), et reliés entre eux par des potelets et des chaînages en bois. Le torchis est réalisé en terre argileuse mêlée de paille qui peut être recouvert d'un badigeon de terre tamisée stabilisé au plâtre et à la chaux, ou de sable-ciment.

Un premier module réalisé sans renforts particuliers n'a pas montré un bon comportement, avec des dégâts plus importants dans les parois du premier niveau, alors que celles du deuxième niveau n'ont pas souffert de dégâts appréciables. Un deuxième module, où l'on a remplacé sur deux panneaux le remplissage de torchis de terre par un enduit de sable-ciment, avec une armature grillagée (double maille de 2 mm de diamètre chaque 20 cm sur le support en « *caña* »), a montré des dégâts au premier niveau et des séparations de pièces clouées entre les deux niveaux. L'armature grillagée a contribué à réduire le déplacement. Enfin, un troisième module muni d'ancrages métalliques entre les deux niveaux a montré un très bon comportement sismique en supportant des accélérations jusqu'à 0,7 g, sans dégâts appréciables.

II.8.3. - Réhabilitation sismique rétroactive

Dans leur rapport de première année d'activité couvrant les développements du « *Getty Seismic Adobe Project* » (GSAP), supporté par le GCI, Charles C. Thiel Jr., E. Leroy Tolles, Edna E. Kimbro, Frederick Webster et William S. Ginell, consacrent un deuxième chapitre à la présentation d'un « cadre de

compréhension des performance sismiques de l'adobe ». Ce rapport est, on doit ici l'avouer, assez difficile à appréhender par un profane de la question. Aussi nous sommes-nous référés à une communication présentée par **E. Leroy Tolles** (1993) qui synthétise la présentation du programme de recherche « GSAP » dans le cadre de la 7^{ème} Conférence Internationale sur l'étude et la conservation de l'architecture de terre », Terra'93, Portugal. Cette communication est par ailleurs complétée par une autre présentation générale du projet « GSAP », par E. Leroy Tolles et William S. Ginell, dans le cadre d'un « *Workshop on the Seismic Retrofit of Historic Adobe Buildings* » organisé en mars 1995 au Musée J. Paul Getty de Los Angeles.

Le principal but annoncé du projet « GSAP » est de développer des approches de réhabilitation sismique rétroactive (« retrofitting ») pour les édifices historiques construits en adobe (début XVIII^e - milieu du XIX^e s.), en Californie. L'approche proposée se démarque de celles couramment développées qui préconisent en général le renforcement structural. Elle privilégie la prise en compte de la stabilité des édifices. Il s'agit alors de profiter au maximum des caractéristiques structurelles inhérentes aux bâtiments en adobe. Cette méthode est présentée comme la plus efficace pour satisfaire à la fois les exigences de sécurité des occupants et pour limiter l'impact d'une réhabilitation rétroactive sur le matériau de construction historique. Ainsi, l'approche basée sur la « stabilité » vise à prévenir la sévérité des dommages structuraux, et notamment l'effondrement, en réalisant des interventions rétroactives qui permettront notamment :

- de garantir une continuité structurale globale ;
- d'empêcher les murs de se renverser par glissement au-delà de leur aplomb ;
- de réduire les déplacements relatifs des parties de murs fissurées adjacentes.

Pour étudier et confirmer l'efficacité des techniques de réhabilitation rétroactives basées sur l'amélioration de la stabilité, des tests ont été effectués à l'aide d'une table vibrante sismique. L'adobe est un matériau d'assez faible résistance, si fait que les constructions présentent souvent des murs épais. A l'occasion d'un séisme, même de faible intensité, des fissures peuvent se développer et dès lors, les techniques de renforcement ne sont plus valides. Mais les murs d'adobe épais présentent des caractéristiques inhérentes de stabilité et un grand potentiel d'absorption de l'énergie. Ce sont ces deux caractéristiques qui méritent d'être valorisées pour améliorer le comportement sismique des constructions en adobe. La ductilité d'un système structural est extrêmement importante pour garantir un bon niveau de performance sismique. Or l'adobe ne présente aucune ductilité structurale. Mais, on doit considérer que le comportement sismique n'entre en compte que lorsque le processus de fissuration est pleinement développé. Ainsi, la ductilité structurale d'un bâtiment en adobe peut être très affectée, par la configuration structurale et par de simples mesures de réhabilitation rétroactive qui améliorent la stabilité. La caractéristique de configuration la plus fondamentale est l'épaisseur du mur et le rapport entre l'épaisseur et la hauteur du mur, soit « l'élancement » (Bariola, 1986). Des mesures de réhabilitation rétroactives qui peuvent n'avoir que des effets négligeables sur la performance élastique d'un bâtiment en adobe, peuvent avoir au contraire un très gros impact sur la performance « post-élastique » en améliorant la ductilité structurale de l'édifice. Mais, la clé pour réaliser des interventions de réhabilitation rétroactive réussies est de bien comprendre, d'une part, les fissures existantes et celles qui pourraient apparaître, et d'autre part, les principaux mode d'effondrement du bâti.

L'épaisseur des murs en adobe et le rapport d'élancement du mur (hauteur/épaisseur) jouent un rôle essentiel sur la stabilité. Ainsi, des enquêtes menées sur le patrimoine d'époque coloniale hispanique montrent que le rapport d'élancement moyen se situe approximativement à hauteur de 5 mais que beaucoup d'autres bâtiments historiques présentent un rapport de 6 à 8. Les auteurs rapprochent ce rapport d'élancement du mur avec des commentaires généraux sur leur stabilité et peuvent ainsi définir 5 catégories de murs :

- des murs épais avec un rapport d'élancement < 4 qui sont presque impossibles à renverser ;
- des murs épais avec un rapport de 4 à 6 qui sont représentatifs des bâtiments historiques typiques et qui sont très durs à renverser ;
- des murs d'épaisseur moyenne, avec un rapport de 6 à 9 qui présentent une certaine stabilité inhérente et que de simples mesures de réhabilitation rétroactive peuvent stabiliser ;
- des murs fins avec un rapport de 9 à 12 qui exigent des mesures plus lourdes pour être stabilisés, et,
- des murs très fin avec un rapport d'élancement > 12 qui sont très fragiles et très difficiles à stabiliser.

Le projet « GSAP » aura permis de mieux comprendre le comportement sismique des constructions en adobe, et notamment de confirmer que la performance sismique n'entre en jeu qu'à partir du moment où le processus de fissuration est engagé. Bien qu'encore élastique, le comportement dynamique d'un édifice en adobe est caractérisé par de petits déplacements et de hautes fréquences. Lorsque les murs ont été endommagés, les déplacements s'accroissent en fonction des ordres de magnitude, et les fréquences de vibration tombent de façon assez spectaculaire. Cela signifie que durant les tests dynamiques qui ont été réalisés sur les modèles avec la table vibrante, qu'il est impossible de discerner les mouvements tant que le modèle n'a pas été endommagé. Mais à partir du moment où les fissures apparaissent, on peut alors facilement étudier le comportement dynamique du modèle, à l'œil nu. Ainsi les fissures initiales apparaissent dans des parties du modèle qui concentrent de hauts efforts, comme au droit des tableaux de portes et de fenêtres et aux intersections des murs. La localisation des fissures peut être déterminée par des techniques d'analyse élastique ou par une bonne connaissance et expérience du processus. Ce n'est qu'après l'apparition de fissures que le renversement des murs peut intervenir. Il s'agit là du principal mode d'effondrement. Les murs qui ne sont pas porteurs sont alors les plus exposés au renversement. Les murs porteurs, d'épaisseur moyenne à épais, sont plus stables et bénéficient à la fois de l'application des charges verticales et de leur liaison avec le plancher et avec la toiture. Les murs pignons sont particulièrement vulnérables au renversement car ils présentent un haut rapport d'élancement et qu'il sont généralement non porteurs. Ainsi, des déplacements relatifs réguliers peuvent conduire à l'irréparable et les dommages cumulés à l'instabilité. Ces déplacements peuvent apparaître à la fois dans le plan du mur ou perpendiculairement au plan du mur. Les techniques d'amélioration de la stabilité sont conçues pour prévenir ce risque de renversement et le déplacement relatif de parties de murs fissurés en stabilité « libre ». L'auteur relève aussi que la qualité de réponse sismique d'un bâtiment en adobe est très liée à sa « santé ». A savoir, l'eau ne doit pas avoir affecté le bâti pour compromettre la résistance du matériau et la maçonnerie doit être en bon état, notamment en ce qui concerne la qualité des liaisons entre les blocs d'adobe et le mortier.

Les techniques d'amélioration de la stabilité qui ont été testées et qui sont rapportées sont les suivantes :

- chaînage et liens flexibles dans une direction de pose horizontale. Le chaînage a été testé conjointement avec des liens flexibles verticaux et des armatures dans l'âme du mur (1/8").
- liens flexibles et armatures dans l'âme du mur dans une direction de pose verticale. Les liens flexibles ont été appliqués sur les deux faces du mur en passant au travers de la base des murs et par dessus le chaînage.
- des agrafes de fissures. Ce sont des liens de petit diamètre appliqués sur les fissures après qu'elles soient apparues.

L'efficacité de ces techniques a pu être évaluée. Ainsi :

- Un chaînage rigide peut avoir un effet sur la performance élastique mais s'il est trop rigide, il peut alors être désolidarisé des murs à l'occasion de secousses, même modérées, et perdre toute son efficacité. En considérant que les dommages dus à un séisme commencent au degré 5 de l'échelle sismique, l'utilité de cette disposition a pu être testée jusqu'à une intensité de 7,5.
- Un chaînage plus flexible, qui est bien ancré aux murs, peut avoir des effets négligeables sur le comportement élastique mais un effet substantiel sur la performance post-élastique. L'utilité de cette disposition a pu être testée pour des intensités de secousses situées entre 5,5 et 8,5.
- Les liens flexibles horizontaux ont prouvé leur efficacité pour une intensité de secousses sismiques située entre 6,5 et 9,5. Leur efficacité entre en jeu à partir du moment où les murs se fissurent et ils réduisent considérablement le risque d'effondrement.
- L'association d'un chaînage flexible avec des liens flexibles verticaux a prouvé son efficacité pour des intensités situées entre 5,5 et 10. Cette association de mesures ne change en rien le comportement élastique ou le comportement pour des dommages limités mais les liens verticaux ont un effet remarquable sur la performance durant de grandes secousses et lorsque les dégâts sont sévères.

Ainsi, les résultats du projet « GSAP » ont clairement démontré l'efficacité des techniques de réhabilitation rétroactives basées sur l'amélioration de la stabilité. La performance de modèles construits à l'échelle 1 : 5, avec des murs dont le coefficient d'élancement est de 7,5, a été grandement améliorée. On notera d'autre part que tous les modèles ont été soumis à des tests de sévérité croissante ; chaque test successif était plus sévère de 20 à 30 % en terme de déplacements et d'accélération.

Dans une autre publication du GCI, rendant compte des dommages causés aux bâtiments historiques en adobe par le tremblement de terre de Northridge, 1994, **E. Leroy Tolles, Frederick A. Webster, Anthony Crosby et Edna E. Kimbro** (1996), consacrent leur troisième chapitre aux typologies des dégâts et à leur évaluation. Cette publication vient compléter des prestations antérieures de cette même équipe de chercheurs qui furent notamment présentées lors du « *Workshop on the Seismic Retrofit of Historic Adobe Building* », organisé par « *Earthen Building Technologies* » au Musée J. Paul Getty, en mars 1995. Au delà de la présentation des dommages propres aux bâtiments situés dans la région de Los Angeles, l'exposé entend délivrer des informations utiles pour caractériser plus généralement les dommages causés à ce type d'édifices par les séismes. Les auteurs décrivent ces dommages de façon détaillée et fournissent des exemples graphiques des bâtiments relevés. Viennent ensuite un ensemble de chapitres (4 à 12) qui présenteront des études de cas spécifiques de plusieurs bâtiments dont les pathologies sismiques sont présentées en détail avec une discussion du degré de sérieux de chaque type de dommage. Le chapitre 3, par la synthèse présentée, est donc aussi une

tentative de théorisation, et c'est en ce sens qu'il nous paraît tout à fait important à considérer. Ainsi les auteurs sont en mesure de préciser les types de contraintes auxquelles sont soumises les habitations en adobe, conduisant à des pathologies de fissuration, notamment par dépassement de la résistance en traction du matériau. Ils rappellent clairement que l'importance des dégâts dépend de facteurs essentiels tels que :

- la sévérité des secousses telluriques ;
- la géométrie des structures avec notamment la configuration des murs d'adobe, des toitures, planchers, ouvertures et du système de fondation ;
- l'existence et l'efficacité de mesures de réhabilitation sismique rétroactive (« seismic retrofit ») ; et,
- les conditions des bâtiments au moment du séisme.

Les auteurs insistent notamment sur le facteur géométrie, en rappelant que le rapport d'élancement (« slenderness ») des murs (rapport entre hauteur et épaisseur), joue un rôle important sur la stabilité. Plus ce rapport est élevé, moins grande est la stabilité. De même des murs consolidés par des contreforts, ou des murs aveugles (sans fenêtres) développeront des dommages différents que les murs non munis de contreforts ou trop percés d'ouvertures. Comme nous l'avons déjà relevé à propos du projet « GSAP », (1991), rapporté par les mêmes auteurs, les mesures de réhabilitation sismique rétroactives telles que chaînages, contreforts, tirants et autres éléments de structure, qui ajoutent de la résilience et/ou de la continuité dans le système structural, ont des effets très positifs sur la stabilité des édifices et sur leur capacité à mieux résister à la violence des secousses sismiques. Mais les conditions du bâtiment, au moment du séisme, sont aussi essentielles. Ainsi, si le bâtiment a déjà précédemment souffert d'un séisme antérieur et s'est alors fissuré, des écroulements de murs en situation libre (sans continuité structurale), sont inévitables. Ainsi, l'existence de pathologies d'humidité, au moment du séisme, contribue-t-elle à réduire considérablement la résistance du matériau au point qu'il ne puisse pas supporter son propre poids. De même, le facteur « intégrité » de la maçonnerie en adobe (la qualité de l'appareillage et des joints horizontaux comme verticaux), joue-t-il aussi un rôle prépondérant dans la stabilité. Les auteurs fournissent ensuite une liste descriptive des dommages types qui sont illustrés par des dessins et des photographies.

Dans leur typologie des dommages les auteurs distinguent notamment :

1 - Les dommages hors plan du mur : (« out-of-plane wall damage »)

Les murs d'adobe sont très exposés à des fissurations générées par des contraintes de flexion imposées par les mouvements hors plan du sol. Bien que ces fissures apparaissent très facilement, l'extension des dégâts n'est pas aussi sévère tant que le mur ne bascule pas. Les principaux facteurs qui affectent la stabilité hors plan des murs en adobe sont les suivants :

- l'épaisseur du mur et son rapport d'élancement ;
- la connexion entre les murs et la toiture, et/ou le système de plancher ;
- s'il s'agit d'un mur porteur ou non porteur ;
- la distance entre deux intersections de murs ;
- les conditions ou l'état de la base du mur.

Ainsi des murs avec un faible rapport d'élancement ($SL \leq 3.5$), ne peuvent pas basculer et opéreront plutôt un glissement horizontal. Alors que les murs avec un haut rapport d'élancement ($SL > 10$) seront très exposés au risque de basculement ou à un flambement à mi-hauteur.

Dans cette typologie hors plan du mur, les auteurs distinguent trois principaux types de dommages qu'il décrivent et commentent précisément :

- l'effondrement des murs pignons par basculement (plus haut et donc plus élancés), total ou partiel (partie haute) ;
- les fissures de flexion hors plan et l'effondrement. Ces fissures sont les premières à apparaître lors d'un séisme et sont associées au mouvement oscillant. Les murs libres (clôture par exemple), sont généralement les plus exposés. Mais ces fissures très typiques apparaissent aussi couramment entre deux intersections de murs (pignon et mur extérieur et/ou mur de refend et mur extérieur) ;
- les dommages de flexion hors du plan, à mi-hauteur, qui affectent notamment les murs ayant un rapport d'élancement élevé, et qui peuvent causer une fissure de cisaillement horizontale suivie d'un effondrement du mur (partie haute et basse).

2 - Les fissures de cisaillement dans le plan du mur :

Ce sont des fissures très typiques et classiques, en « X », ou des fissures diagonales simples causées par les contraintes de cisaillement dans le plan du mur. La fissure en « X » apparaît lorsque le mouvement du sol agit dans deux directions opposées.

3 - Les dommages aux angles :

Ces dommages sont de trois types :

- Les fissures diagonales aux angles qui partent généralement du haut pour se diriger vers le bas, et qui sont causées par des forces de cisaillement dans le plan du mur.
- Les fissures verticales aux angles, qui sont dues à des mouvements de traction et de flexion hors du plan du mur. Si les fissures verticales apparaissent sur les deux faces de l'angle, celui-ci peut s'effondrer.
- La combinaison des fissures verticales et diagonales, ou du fait de l'existence de fissures antérieures. L'angle peut alors s'effondrer vers l'extérieur.

4 - Les fissures aux ouvertures :

Les ouvertures sont très directement exposées au risque de fissuration, beaucoup plus que les autres parties de l'édifice. Elles proviennent du fait que les ouvertures concentrent des contraintes élevées. Ces fissures partent des angles haut et bas des ouvertures et progressent vers le haut et/ou vers le bas, en direction diagonale ou verticale.

5 - Les dommages à l'intersection des murs perpendiculaires :

Lors de fortes secousses, l'intersection de deux murs perpendiculaires est soumise à de fortes contraintes. Notamment lorsque l'un des deux murs oscille hors du plan (effort transversal), alors que l'autre demeure très rigide dans le plan. Les deux murs peuvent alors se séparer.

6 - Glissement entre le mur d'adobe et la toiture, le plafond ou la structure du plancher :

Ce sont les faibles liaisons structurales, entre ces différents systèmes, qui résultent typiquement en un glissement. Dans les cas les plus sévères, le mur peut glisser au point de ne plus soutenir le plancher ou la toiture, qui s'effondrent.

7 - Damage aux ancrages de mur :

Il peut arriver que des ancrages entre deux murs, ou des tirants de murs à murs, aient été posés par suite d'un séisme antérieur. Lors d'un nouveau séisme, les efforts sont alors très concentrés au droit de ces ancrages où les

adobes résistent mal car elles n'encaissent pas les efforts de traction, et de cisaillement.

8 - l'instabilité d'une partie localisée du bâtiment :

Des sections de murs du bâtiment peuvent être très instables à la suite du développement de fissures. C'est notamment le cas lorsqu'il existe une concentration d'ouvertures à proximité des angles du bâtiment. Les angles s'effondrent alors très facilement.

9 - Fissures horizontales dans les parties hautes des murs :

Lorsque les murs sont ancrés aux toitures, des fissures horizontales peuvent apparaître en leur partie haute. Egalement lorsque les murs ont été chaînés. Les fissures se développent à la jonction des systèmes mur/chaînage et/ou mur/panne sablière. Elles sont générées par des mouvements latéraux hors du plan.

10 - Les dommages d'humidité contribuant à l'instabilité :

Lorsque la base des murs d'adobe est affectée par des problèmes d'humidité (capillarité, etc.), leur résistance est très affaiblie. Les secousses peuvent alors générer une fissure horizontale, dans toute l'épaisseur du mur, causant l'effondrement par glissement de la partie du mur située au dessus de cette base humide.

Au-delà de cette description typologique des dommages sismiques, les plus courants, les auteurs s'attachent ensuite à préciser les effets des conditions préexistantes. Ils insistent particulièrement sur les dommages d'humidité. Ainsi, l'eau est présentée comme la menace la plus importante pour les bâtiments en adobe situés en région sismique. L'érosion des soubassements, à cause de problèmes de capillarité, de rejaillissement, de ruissellement, l'attaque du matériau par les sels solubles se développant lors des processus d'évaporation, qui cristallisent et font éclater le matériau, l'action érosive de la faune (rongeurs, insectes, autres animaux) et de la végétation, sont autant de facteurs qui affaiblissent considérablement les murs et les exposent davantage au risque sismique. En effet, lorsqu'un mur d'adobe est saturé d'humidité, sa résistance à la compression et à la traction peut être réduite de 50 à plus de 90 %. Les cycles répétés de mouillage/séchage peuvent aussi affaiblir considérablement les murs.

De même lorsque les murs ne sont plus d'aplomb. Ils sont alors très exposés. Cela dépend toutefois de l'importance de ce faux aplomb. Ainsi un mur d'environ 50 à 60 cm d'épaisseur, qui présente un faux aplomb de 2,5 à 5 cm n'est pas très exposé. Mais si ce faux aplomb est de l'ordre de 15 cm, le risque est alors élevé.

Egalement lorsque le bâtiment a déjà été fissuré, soit pour des raisons accidentelles (tassement différentiel par exemple), ou des suites d'un séisme antérieur. Si ce sont des fissures structurales importantes qui mettent des pans de mur en situation de stabilité libre, ceux-ci sont directement exposés à l'effondrement par basculement.

Les auteurs concluent ce troisième chapitre de leur publication en proposant une grille d'évaluation de la sévérité des dommages sismiques. Cette grille définit en termes « subjectifs » le degré de sévérité des dommages, sur la base de leur description pour l'ensemble de la structure, et en évaluant le degré de sévérité relatif des types de dommages. Les auteurs comparent alors des états de dommages standardisés proposés par le « *Earthquake engineering Research Institute* » (EERI), et des commentaires issus de leur étude sur les

dommages sismiques causés aux bâtiments historiques en adobe de la région de Los Angeles. Ainsi, suivant les 5 états de dommage proposés par l'EERI (A, Sans dommage, B, Légers dommages, C, Dommages modérés, D, dommages importants et E, destruction complète), les auteurs décrivent les types de dommages observés, de façon factuelle. Cette première approche est complétée par une évaluation du degré relatif de sévérité des types de dommages, en reprenant alors la typologie des dommages précédemment présentée, et en précisant par commentaire, et pour chacun des dommages types, le degré de risque pour la vie future des occupants de l'édifice (« Life-safety hazard »).

Nous relevons l'excellence de cette contribution à la connaissance des pathologies sismiques qui, au-delà de ce chapitre 3 de synthèse, avec l'ensemble des études de cas présentée dans les 9 chapitres suivants, et avec les conclusions relevant notamment la relation entre les conditions préexistantes des bâtiments et les dommages observés. Ces conclusions permettent d'insister à nouveau sur élévation du risque, du fait de mauvaises conditions préexistantes (humidité, fissures antérieures), mais aussi sur un moindre risque lorsque les bâtiments sont bien construits et en bon état. Ou encore lorsqu'il ont fait l'objet de mesures de réhabilitation rétroactive. Cette recherche aura produit une information essentielle sur les performances sismiques des constructions en adobe alimentant de fait les recherches sur les modes de réhabilitation rétroactive et de manière plus générale sur la réhabilitation et la construction parasismique.

II.8.4. – Une approche de caractère culturel

En 1993, Le **Centre Universitaire Européen pour les Biens Culturels (C.U.E.B.C.) de Ravello**, (Italie) présente un projet d' « Atlas des cultures sismiques locales », associé à l'objectif de « réduire la vulnérabilité du bâti par la récupération des cultures sismiques locales ». Cette proposition n'est pas directement liée au propos spécifique de la conservation de l'architecture de terre, mais mérite que l'on s'y arrête. Dans le cadre des débats du colloque « Terra'93 », au Portugal (Silves), nous avons nous-mêmes suggéré de développer une recherche qui irait dans ce sens, considérant que les bâtisseurs traditionnels avaient apporté une réponse en terme d'architecture et de systèmes constructifs « résistants aux séismes ». Nous nous étonnions alors qu'une recherche qui tendrait à identifier les cultures constructives des régions à risque sismique n'ait pas été plus concrètement engagée. Cette contribution du C.U.E.B.C. participe au comblement de cette lacune. Reprenons ici, en synthèse, la teneur du propos développé dans un petit document de présentation de cet « Atlas des cultures sismiques locales ».

Dans les régions sismiques, les cultures constructives locales sont très marquées par le risque des catastrophes naturelles. Si ce risque est récurrent, il est alors possible que les bâtisseurs aient développé des techniques particulières, notamment dans le domaine antisismique. Les chercheurs de Ravello font le constat que les ouvrages de caractère monumental ou « majeurs », (églises, temples, palais, ponts), dont la construction a requis des ressources importantes, bénéficient de l'intégration de ces particularités techniques et d'un entretien plus soutenu contribuant à leur bonne conservation, du fait d'une « sur protection ». Le bâti historique « mineur » est par contre un patrimoine plus difficile à conserver. Ne bénéficiant pas d'une protection « institutionnelle », il demeure très vulnérable, même si ce patrimoine a pu intégrer des dispositions antisismiques. L'exemple donné concernant les

maisons de Lefkas (Grèce) conçues selon le principe d'une double structure (pierre et bois), est à ce titre tout à fait remarquable.

De nos jours, la tendance observée dans les pays « riches » à une valorisation de la récupération du bâti, à sa conservation, permet de réhabiliter des techniques traditionnelles. Mais les auteurs rappellent que la majorité des pertes humaines résultant de séismes ravageurs qui font s'écrouler les habitations, sont à déplorer dans des régions sismiques « pauvres ». L'introduction de techniques modernes, dans ces régions, génère aussi une perte de savoir-faire, et les édifices contemporains, trop souvent, n'intègrent plus la culture antisismique locale. Le risque en est considérablement augmenté pour les populations. Les auteurs relèvent que « les règlements antisismiques » ne remplacent pas la « culture sismique ». Ils font le constat que plusieurs séismes ont montré une meilleure réaction de certains édifices anciens par rapport aux constructions modernes. Ou encore que si ces édifices anciens étaient endommagés sérieusement, cela pouvait découler de modifications et/ou de renforcements non adéquats. D'une part les règles anciennes ne sont pas appliquées, car considérées désuètes, d'autre part, les normes actuelles non plus car trop coûteuses. Ainsi, les risques sont plus importants, « à la fois parce que la communauté a perdu la maîtrise des techniques parasismiques attestées et que les règlements antisismiques ne sont pas devenu "culture" ».

La prévention peut donc en partie passer par la récupération « critique » des techniques antisismiques traditionnelles. D'autant que dans la plupart des régions à risque, une majorité du bâti remonte à une époque antérieure au béton armé. Le C.U.E.B.C. de Ravello se donne l'objectif de reconnaître les règles anciennes parasismiques dans le bâti traditionnel, de sélectionner ces règles, et d'étudier les possibilités de leur réintégration dans les pratiques courantes de construction. La tendance actuelle pour protéger les bâtiments contre les séismes est plutôt à la mobilisation de techniques de pointe, de modèles mathématiques informatiques, ou de campagnes de recherche coûteuses. Mais les auteurs pensent que cette tendance a ses limites. Car ces outils de connaissance actuels sont difficilement applicables à l'analyse du patrimoine « mineur » ainsi qu'à l'étude du comportement des usagers qui joue aussi un rôle important. Bien sûr, il convient de sensibiliser les communautés, dans les régions sismiques, sur l'importance de l'entretien du bâti, sur une vigilance quant aux modifications tendant à rompre l'équilibre original, sur l'intégration d'une forme « d'efficacité parasismique des techniques traditionnelles ». Mais cela est insuffisant, et peu opérationnel, car les propriétaires n'ont souvent pas les moyens de réaliser cet entretien qui est à leur charge. De plus, si les états aidés par une solidarité internationale doivent reconstruire, « le système aura tendance à "attendre" le tremblement de terre plutôt qu'à le prévenir. »

Il faudrait donc développer une nouvelle approche et reconsidérer différemment le bâti ancien qui existe finalement, car il a « résisté à tous les séismes intervenus au fil des siècles ». Le propos est un peu globalisant car l'on sait aussi, par ailleurs, que des villes traditionnelles, avec leurs monuments et leur habitat, ont été considérablement détruites par des séismes. Mais il est vrai que les hommes ont le plus souvent fait l'effort de reconstruire en conservant, si possible, leur mémoire architecturale. Alors, les chercheurs du C.U.E.B.C. préconisent de voir le patrimoine comme une « source d'information » plutôt que comme un « objet sur lequel intervenir ». Un patrimoine qui peut nous « apprendre ». Il faudrait ainsi « renverser le rapport actuel entre sciences exactes et patrimoine ». L'association de l'ingénierie parasismique et des sciences exactes, certainement, mais complétée par le recours aux

méthodologies des sciences humaines (archéologie, histoire, économie), afin de mieux retrouver la « raison d'être d'une technique ou d'une modification particulière », dans le bâti. Réduire la vulnérabilité du bâti ancien passe par l'encouragement des communautés à pratiquer de façon critique « ses » techniques antisismiques, par un entretien qui soit adapté aux ressources locales disponibles et aux « systèmes » locaux, ainsi qu'aux caractéristiques spécifiques des secousses locales récurrentes, comme à la culture et à l'économie. Toutefois, la « récupération » des cultures sismiques locales doit redevenir un « patrimoine » de la communauté qui doit donc se les approprier de nouveau, elle-même. « Cela est-il trop empirique ou simpliste » comme peuvent le penser « les experts habitués à raisonner sur des données numériques » ? Pas tant que cela car la récupération des cultures sismiques locales repose « sur des méthodes tout à fait actuelles (...) et requiert l'application de procédures tant rigoureuses que de validité générale ». Il conviendrait alors de « ranimer un processus d'évolution permanente qui a toujours caractérisé l'histoire des civilisations mais qui, aujourd'hui, est souvent remplacé par l'innovation ». Les techniques éprouvées par des siècles d'adaptation continue ne peuvent pas être aussi simplement abandonnées alors que les techniques actuelles n'ont pas encore pleinement démontré leur validité, ni les altérations qu'elles peuvent induire sur le patrimoine architectural.

Comme outils et procédures permettant de donner plus de rigueur scientifique à cette nouvelle approche, les chercheurs du C.U.E.B.C., proposent d'analyser très concrètement les « composantes » et de définir les notions et les facteurs des cultures sismiques locales, puis d'émettre des hypothèses à tester sur la relation entre séisme et culture sismique. Mais pour « assister à la formation d'une culture sismique, il faut que les séismes aient une "bonne" combinaison d'intensité et de récurrence ». Les chercheurs considèrent qu'une culture sismique se forme si « l'intensité est forte mais non catastrophique (intensité VIII-X sur l'échelle MM), et si la récurrence est telle qu'une génération est frappée au moins deux fois (40-60 ans) ». Dans ce cas les techniques éprouvées peuvent être améliorées et on peut alors parler de « culture sismique de prévention ». Si les séismes sont plus espacés, les connaissances peuvent s'évanouir et la culture sismique locale « tend à se relâcher ». On parle alors de « culture sismique de la réparation ». L'identification des cultures sismiques locales encore existantes, dans les zones sismiques, peut bénéficier de l'application des « modèles conceptuels de « prédiction » (recherches historiques et archéologiques), sur la base de la récurrence et de l'intensité des séismes qui ont pu contribuer à leur intégration dans l'architecture qui en porte des « signes ».

Les outils de récupération par un « repérage » demandent « une solide connaissance de l'architecture, de la pathologie des structures, de la sismologie, de la géographie, de l'économie, de l'histoire et de l'urbanisme ». Les chercheurs ont mis au point une procédure permettant d'intégrer l'action des spécialistes sur la base de « protocoles » testés sur des études (San Lorenzo, Italie, Lefkas, Grèce) ayant permis de sélectionner dans un ensemble « d'anomalies » celles qui ont une fonction antisismique.

La récupération des cultures sismiques locales est une action polyvalente qui stimule l'entretien et le respect des règles antisismiques durant la phase préventive. Elle permet de mieux analyser les dégâts causés au patrimoine après la secousse, et donc de préserver l'identité culturelle locale en évitant de démolir ce qui peut être restauré. Elle contribue à maintenir les populations dans des édifices encore suffisamment stables. En phase de réhabilitation, si la culture sismique a été récupérée, « le système local est mieux protégé contre

l'invasion de produits non adaptés ». Par ailleurs cette récupération valorise le savoir-faire local et donc participe d'une stratégie de développement durable.

Les activités du C.U.E.B.C. et leurs publications méritent d'être suivies par l'ensemble de la communauté scientifique s'intéressant à la prévention sismique et sans doute plus largement diffusées vers les communautés concernées par ce risque majeur qui cause de nombreuses pertes humaines et d'importants dommages au patrimoine architectural.

II.9 - Le « monitoring » des désordres

Il est étonnant de constater que la littérature scientifique sur la conservation des architectures de terre fasse si peu état des techniques de « monitoring » des pathologies. Sauf dans le domaine des recherches sur l'architecture de terre résistantes aux séismes, qui ont considérablement progressé et très bien intégré cette question, comme on la vu au précédent chapitre. Par ailleurs, au vu de la littérature, sans préjuger des pratiques des opérateurs du terrain, le contrôle de l'évolution potentielle des pathologies constatées lors d'un pré-diagnostic visant à pré-identifier les causes des maux et leurs origines semble être dans l'ensemble assez négligé. Si l'on considère les deux grands domaines de pathologies que sont l'humidité et le structural, on remarquera que le « monitoring » structural » semble être davantage développé que le « monitoring » des problèmes d'humidité. Il est notamment question du « monitoring des fissures dans les murs en adobe, à l'aide de jauge de mesure de l'écartement, ou plus simplement à l'aide de témoins visuels réalisés au mortier de plâtre. Pour les problèmes d'humidité, les opérateurs semblent s'en tenir principalement à l'utilisation de petits appareils portables (humimètre, « humitest », etc, cf. R. Collombet, 1984-89 et M. Bendakir, 1993) et rares sont les programmes instrumentés au moyen de sondes à résistance électrique, mesurant la conductivité électrique des matériaux soumis à des remontées capillaires, qui par ailleurs, ne semblent donner que des mesures d'humidité toute relative et donc peu aisément exploitables (cf. M.R. Taylor, 1987, programme de Fort Selden, p.e.). On a aussi déjà évoqué le principe de l'analyse multispectrale VHS qui permet de repérer la présence d'humidité dans l'épaisseur des matériaux mais rarement utilisé car relativement coûteux. Au-delà de ces formes rares d'instrumentation du « monitoring » des pathologies, on remarquera que les contrôles sont essentiellement assurées par un suivi documentaire, principalement par le relevé photographique, par des fiches de relevé des conditions de l'architecture et par une documentation écrite.

On trouve par exemple une évocation du monitoring structural dans un rapport d'évaluation des conditions de l'église « *Nuestra Señora De Guadalupe* », Zuñi, Nouveau Mexique, publié en avril 1992 par l'équipe de « **The New Mexico Community Foundation** » concernant le programme « *Churches : Symbols of Community* ». Il s'agit de la pose de « moniteurs » permettant de mesurer le mouvement superficiel des fissures d'un enduit et les éventuels mouvements à l'intérieur des murs eux-mêmes. Ce même principe d'instrumentation est également décrit en détail, et illustré, dans le « *Adobe Architecture Conservation Handbook* », publié en 1998 par **Francisco Uviña Contreras** et l'équipe de « *Cornerstones Community Partnerships* », qui apportent toutes précisions quant au mode de mise en œuvre du procédé.

On aura aussi repéré l'énoncé de dispositions de « monitoring » du procédé de « backfilling », associé à la pose de géodrain verticaux et horizontaux, dans un document de projet (1988) proposant de tester des stratégies pour la protection des ruines archéologiques du Parc Historique National de Chaco. Ce document présente un programme entrepris dans le cadre d'une collaboration entre le « *National Park Service Southwest Région* »; la « *Chaco Culture National Historical Park* » & la « *Division of Conservation* » de Santa Fe, Nouveau Mexique, et le « *Getty Conservation Institute* ». Les systèmes de monitoring proposés sont le suivi photographique, la mesure des taux d'humidité des sols adjacents aux murs exposés et proches des drains, l'observation de panneaux de monitoring, de l'érosion à partir de pointes de repère enfoncées dans les panneaux de monitoring (pièce 128). On repère aussi la mesure de quantités d'eau drainées récoltées par des réservoirs et l'observation visuelle de l'érosion de la base des murs ou de la croissance de la végétation (pièce 368 et 372). Nous reviendrons plus en détail sur ce programme dans notre troisième partie, « Interventions ».

II.10 - Brève conclusion

Si les pathologies de l'architecture de terre, structurales et d'humidité, sont désormais davantage connues du point de vue de l'observation des phénomènes et des symptômes, l'explication de leurs causes demeurent toujours un exercice analytique difficile. Car il n'y a pas souvent et aussi simplement « une » cause et « un » effet. Il y a le plus souvent un système de causes qui se répercute sur une suite de conséquences agissant par « effet domino ». Et, dans cette logique, il convient de prendre du recul sur la seule observation macro-visuelle des pathologies du matériau et même des structures. Il convient d'étudier un plus large « environnement » historique, physique, climatique, économique et socioculturel. Cela a été relevé dans ce chapitre par plusieurs auteurs mais l'on sait combien, dans les faits de l'analyse, il est difficile de prendre ce recul nécessaire en admettant que l'édifice en terre « vit » avec son environnement et qu'il faut peut-être, d'abord, ou pour le moins simultanément, faire un diagnostic de l'environnement. L'interaction des facteurs climatiques (pluie, soleil, vent) n'est à notre sens pas assez prise en compte. Par ailleurs, si l'on peut admettre qu'il existe une « typologie » de pathologies de structure et d'humidité, chaque édifice étudié, analysé, demeure toujours un « cas unique ».

Les méthodes de l'analyse-diagnostic fondée sur la qualité d'un travail préalable de relevé des conditions ou de l'état des édifices en terre, qui ne doit rendre compte que des faits, sans interprétation trop hâtive, on a pu le voir, ont considérablement évolué au cours de ces 15 dernières années pour s'établir dans la spécificité d'un domaine disciplinaire. Mais, ces méthodes sont encore l'expression de l'évolution d'une recherche scientifique qui commence à peine à poser ses fondements théoriques. C'est dire l'écart qui peut demeurer quant à l'appréhension concrète de ces outils méthodologiques et de ces bases de théorisation, dans les faits de l'étude et de l'analyse-diagnostic, sur le terrain. Ainsi, la littérature révisée montre bien combien le relevé de conditions constitue très souvent un pré-diagnostic sommaire, trop rarement suivi d'une analyse fouillée qui permettrait, avec une vraie campagne de « monitoring » des pathologies, de bien identifier les pathologies et surtout les causes de leur genèse. Pourquoi en est-il ainsi ? Peut-être parce que l'intervention de stabilisation et de préservation « d'urgence », prennent le pas sur le projet de « conservation » à moyen et long terme. Peut-être aussi parce que les moyens

financiers attribués aux projets de conservation des architectures de terre (sites archéologiques et édifices historiques), ne sont pas suffisant pour autoriser cet investissement analytique amont pourtant si indispensable. Car, il faut encore le rappeler, il ne saurait y avoir de bonne conservation sans bon diagnostic. Il est en effet nécessaire que l'on prenne une plus juste mesure de « l'obligation » d'investissement, en moyens, comme en temps, dans le relevé des conditions et dans l'analyse-diagnostic intégrant plus concrètement le « monitoring » des pathologies, encore souvent négligé.

Comme on l'a exprimé, dans notre conclusion de la première partie, s'il y a matière à définir des procédures d'analyse des matériaux plus « adaptables » et « accessibles », il y a certainement matière à faire de même pour mettre à la disposition des opérateurs, des outils de diagnostic d'un usage plus flexible et « appropriables », aux performances mieux adaptées, selon les objets traités, les niveaux de problèmes rencontrés, les compétences mobilisées et les contextes d'opération. Il conviendrait d'établir, dans ce domaine, un langage interdisciplinaire commun (archéologie, architecture, conservation), fondé sur l'existence de théories, de méthodes et d'outils pratiques plus universellement acceptés par la communauté des scientifiques et des praticiens de terrain.

Il y a certainement aussi des approches plus spécifiques de l'analyse-diagnostic à mieux développer, notamment pour aborder les différentes techniques de construction en terre. Car, nous avons, à ce jour, à notre disposition, soit un propos trop « généraliste », qui entend couvrir l'ensemble des techniques de construction en terre (torchis, bauge, adobe, pisé), ou des propos déjà un peu plus spécialisés, comme pour l'adobe, alors que les autres techniques n'ont pas encore établi leur spécificité. Il y a bien pourtant des différences de comportement entre des systèmes de construction mixtes (bois et terre pour le torchis), monolithiques (bauge et pisé), ou en maçonnerie (adobe).

On a pu également remarquer que l'étude et l'analyse des « micro-pathologies » et de la biodégradation, sont trop peu développées. Ce sont là, certainement, de nouvelles voies de recherche mais qui, là encore, ne doivent pas être isolées de la prise en compte de l'objet construit, de son architecture, dans leur plus grande dimension, et d'un plus large environnement. Car, la biodégradation est souvent un effet secondaire de pathologies qui se sont développées en amont (humidité notamment), ou peut résulter directement de l'impact de facteurs d'environnement sur le bâti en terre (climat, comportement social et culturel des population, situation économique du contexte). Quoi qu'il en soit, les causes, les facteurs et les mécanismes de cette biodétérioration des architectures de terre doivent être mieux connus afin de pouvoir rechercher des formes, techniques et produits de traitement plus efficaces, plus durables. Un regard plus attentif sur les connaissances, les techniques, les produits utilisés pour le traitement de la biodétérioration, dans des domaines technologiques collatéraux (pierre, bois, céramique, métaux, autres matériaux organiques, etc.), serait sans aucun doute utile pour fonder les voies de la recherche pour l'architecture de terre.

Enfin, il faut reconnaître que les recherches en matière d'étude et d'analyse des dommages sismiques causés aux architectures de terre, ont considérablement apporté aux connaissances scientifiques, au cours de ces 15 dernières années. Les apports des recherches des Universités de Stanford et de Berkeley (U.S.A.), de Lima (Pérou) et du programme GSAP, soutenu par le GCI, et sans doute aussi d'autres programmes qui nous sont moins connus, ont contribué à la genèse d'un savoir commun aux chercheurs et aux praticiens qui travaillent sur ces questions. La typologie des pathologies sismiques des architectures de terre (au moins pour l'adobe et un peu moins pour le pisé, le torchis), est

désormais connue. Quant aux modes d'intervention, qui seront plus directement abordés dans la prochaine partie, au plan préventif, comme au plan de la réhabilitation rétroactive, une véritable révolution a été réalisée en prenant davantage en compte la stabilité et l'intégrité structurale des édifices, comme leur ductilité, plutôt que leur renforcement ou leur confinement. La meilleure prise en compte critique des « cultures constructives parasismiques » ajoutera certainement à cette révolution. Mais il y a toujours des querelles d'école. En tout cas la science comme les opérateurs gagneraient à disposer d'une réelle synthèse de la question.

III – INTERVENTIONS, TRAITEMENTS ET EVALUATION

III.1. - Liminaire

• Quelle philosophie, quelle attitude, quel regard sur l'objet, et quel mode d'appréhension ?

Les phénomènes et symptômes des maux dont souffrent les architectures de terre ont été observés, constatés, puis relevés, de manière à dresser un état le plus clair possible des pathologies qu'il faudra traiter. Mais, au-delà du diagnostic, face à la nécessité de l'intervention, les conservateurs des patrimoines architecturaux en terre sont longtemps restés démunis n'ayant pas de cadre de référence théorique spécifique et encore moins d'outils pratiques pouvant guider leurs actions. Très souvent, le constat dramatique d'une dégradation rapide des vestiges archéologiques en terre mis au jour par les fouilles archéologiques, ou d'une détérioration des bâtiments historiques abandonnés, non utilisés, ou mal entretenus, met les conservateurs soucieux de préserver la valeur des ressources culturelles sur lesquelles ils travaillent en situation « d'urgence ». Il faut en effet « sauver » ces ressources pour « préserver » la mémoire de l'histoire de l'humanité. Il faut préserver pour « transmettre » ce legs aux « générations futures ». Mais, « l'urgence » est-elle bonne conseillère au-delà de son invitation à « agir » le plus rapidement possible ? Cela n'est pas si sûr car bon nombre d'expériences faites dans l'urgence montrent trop souvent qu'elles sont plus préjudiciables que valables. D'autres connaissent un certain succès. A regarder de trop près l'objet sur lequel on doit intervenir, qui dans le cas de l'architecture de terre n'est pas un artefact exposé dans un musée, on oublie de considérer l'environnement qui agit sur l'objet, on oublie le système d'équilibre qui résulte de leurs interrelations, de leur interactions, de leur « inter-respiration ». Ainsi, l'intervention trop directe sur l'objet et dans l'urgence, peut soit contribuer à rompre davantage le système d'équilibre, et donc à accélérer le processus de dégradation, soit à réintégrer en partie le système d'équilibre, et donc à ralentir le processus de dégradation. L'intervention d'urgence est donc toujours délicate.

L'attitude qui consiste à mettre en application le concept de conservation « préventive », déclinant généralement une intervention « minimale » et « réversible », avant d'envisager d'autres interventions qui pourront garantir une conservation plus « durable », ne doit pas être oubliée ou même négligée. La conservation des architectures de terre exige une attitude fondée sur cette « philosophie ». Une attitude plus « douce » que « dure ». Et peut-être, d'un point de vue métaphorique, une médecine plus « homéopathique » « qu'allopathique ». C'est selon la gravité des maux à soigner dira-t-on. Sans doute. Mais il convient certainement de ne pas oublier de soigner aussi l'environnement qui est le plus souvent à l'origine des problèmes observés, ou pour le moins de reconnaître sa présence agissante, et de savoir « dialoguer » avec lui, de bien vouloir et savoir « faire alliance » avec lui.

De plus en plus nombreux opérateurs et chercheurs en conservation architecturale s'interrogent sur cette question de la philosophie et de l'attitude devant guider l'intervention, en considérant les différents niveaux « d'échelle », depuis le « macro » environnement, au « micro » environnement. Il nous a

semblé particulièrement important, dans cette revue de la littérature scientifique, de relever quelques propos et points de vue qui se situent dans ce cadre et qui prennent une valeur introductive pour ce troisième chapitre sur les interventions, traitements et leur évaluation. Ainsi, avant d'entrer dans des considérations techniques on distinguera des propos de nature philosophique et éthique, des propos de nature théorique et d'autres qui relèvent davantage du domaine des « recommandations » générales. Ces propos nous semblent tous d'une grande utilité pour mieux poser la problématique de ce chapitre.

• Les insuffisances de l'évaluation

L'évaluation des interventions et traitements de conservation des architectures de terre est bien évidemment essentielle pour faire avancer les connaissances théoriques, les approches méthodologiques et les pratiques conservatoires, dans les faits de l'action de terrain. Comme elle est aussi indispensable pour orienter la recherche et le développement dans le domaine. Nous avons, dans cette révision de la littérature, couvert quinze années de production scientifique ou littéraire. Et cela n'est pas aussi peu que l'on serait enclin à le penser. Car, ce sont effectivement ces quinze dernières années, qui ont produit le plus de littérature sur le sujet. Dans cette production, les grandes conférences internationales sur la préservation des architectures de terre qui ont eu lieu depuis près de 15 ans (Rome, 1985, Las Cruces, 1990, Silves, 1993) et d'autres événements scientifiques nationaux et internationaux à corréler, auront certainement apporté des éléments nouveaux et fondamentaux de connaissance pour faire avancer et mieux structurer la science de la conservation des architectures de terre. Car simultanément se développait, au-delà des pratiques empiriques, voire hasardeuses de terrain, une véritable recherche scientifique fondamentale et appliquée. Mais, le plus souvent, la production littéraire ne reflète principalement qu'un ensemble d'études de cas qui rendent compte de l'évolution des expériences, dans une communauté d'opérateurs souvent isolés et que seuls des événements comme les séminaires, colloques et conférences sus-évoqués, peuvent réunir pour échanger, partager, leurs expériences, leurs savoirs en acquisition, en évolution. Faire un compte-rendu de ses expériences n'est pas pour autant faire une évaluation des interventions, même si c'est une façon de mettre le pied à l'étrier pour aller dans ce sens. Ainsi, la littérature fait peu cas de véritables évaluations. Ce sont souvent des compte-rendus de campagnes de « monitoring » qui se limitent à des constats et/ou à l'expression d'observations macro-visuelles. Les analyses fouillées, les synthèses sont rares. Par ailleurs, ce ne sont pas le plus souvent les « interventions » qui sont évaluées mais davantage les recherches à caractère exploratoire. Nous avons donc, au fil de ces 15 ans passés la possibilité de donner une « vision » de l'évolution des savoirs et des pratiques qui est considérablement limitée par ce que l'on désignera comme les « insuffisances » de l'évaluation. Mais, notre souci a principalement été de restituer les propos de chercheurs ou de praticiens qui, à notre sens, auront plus particulièrement contribué à faire avancer le savoir en offrant une réflexion qui prend suffisamment de « recul » ou « d'altitude », en forme de bilans qui contribuent à établir des « paliers » de l'état des connaissances essentiels pour ouvrir sur un progrès de la science dans le domaine couvert. Parmi les contributions qui ont particulièrement retenu notre attention, se trouvent celles qui dressent une évaluation comparée de divers traitements de conservation.

Ainsi, ce chapitre rend aussi compte de discussions de programmes de recherche scientifiques, ou recherches-action, comme de projets réalisés ou en cours de développement, sur lesquels un regard d'analyse scientifique, ayant

valeur d'évaluation, aura été porté. Les propos restitués sont loin de couvrir la question de l'évaluation des interventions de façon exhaustive. Beaucoup de procédés et de formes d'intervention ne sont finalement pas évalués, ou très sommairement. On ne peut que le regretter. Sur la base des sources étudiées on aura essentiellement pu couvrir les seuls aspects suivants, et sans aucun doute, bien insuffisamment malgré nous, à savoir, les procédés de ré-enterrerment ou backfilling (angl.), de protection de surface par enduits, badigeons, peintures, imprégnations chimiques, de protection par géotextiles et enfin, quelques considérations sur l'évaluation des techniques de réhabilitation sismique.

III.2. - Démarche appropriée, recommandations générales

III.2.1. - Préserver la valeur en privilégiant l'emploi des matériaux, techniques et savoir-faire originaux

Todd R. Metzger, Larry Nordby et Jim Trott, spécialistes de la préservation du « National Park Service » publiaient en 1988, un rapport d'évaluation du site de Pueblo Grande (Phoenix, Arizona). Ce rapport a retenu notre attention pour son exposé introductif sur la philosophie de la préservation qui est résumée en 4 points :

- 1 - La préservation des valeurs culturelles et patrimoniales d'une ressource donnée est l'objectif de l'activité de préservation. La préservation du matériau est plutôt un produit annexe de cette approche et l'attention portée à la préservation de l'intégrité du savoir-faire artisanal original, que l'on oppose au simple fait de préserver la forme et les grands aspects de la ressource, est une considération essentielle.
- 2 - L'accent donné à la préservation de la valeur conduit à recommander l'appel à un savoir-faire artisanal original réhabilité et à sélectionner des matériaux de préservation qui sont similaires aux matériaux originaux, autant qu'il est possible de le faire. Cependant, cette approche n'est pas incohérente avec la jouissance publique du site et l'interprétation, car elle conduit en fait à une mise en valeur de l'expérience du visiteur.
- 3 - L'usage de matériaux et de techniques qui sont similaires à ceux d'origine préserve les valeurs, mais implique généralement une présentation moins durable. En retour, cela nécessite un programme d'entretien des vestiges exposés. Le « National Park Service » a découvert, après plusieurs années d'expérience qui s'appuient sur des projets majeurs de préservation développés sur des cycles de 10 à 20 ans, que cette attitude peut être un échec et a été conduit à transférer son accent donné à la préservation sur des programmes courts d'entretien.
- 4 - Les projets ou programmes de préservation consistent en plusieurs phases de mise en œuvre mais uniquement après qu'une phase préliminaire essentielle de recherche ait été réalisée. Cette recherche consiste normalement :
 - (a) dans une compilation de la documentation architecturale en utilisant les notes produites durant les projets archéologiques antérieurs, notes qui sont augmentées d'une observation détaillée des murs exposés, sur le terrain ;
 - (b) en des études sur le matériau qui décrivent et évaluent les propriétés physiques des mortiers de construction originaux, des pierres, du bois ;

(c) en une recherche sur des problèmes de préservation inhabituels du fait que le site de Pueblo Grande est inclus dans un environnement urbain (proximités de vibrations phoniques générées par les trains et les avions, pollution atmosphérique, etc.). Toutes ces études devant faire l'objet d'un rapport.

Nous avons là en effet l'exposé de points tout à fait essentiels qui peuvent être généralisables à l'ensemble de la problématique de la conservation des architectures de terre, pour les points 1, 2 et 3. Quant au point 4, il relève des caractères plus spécifiques au site et au contexte, nous rappelant en cela que chaque objet architectural, chaque site, reste « unique ». Ce point 4 nous rappelle à l'importance de considérer l'environnement dans lequel s'inscrit le site. On sera encore amené à revenir sur cet aspect.

III.2.2. - Quels centre d'intérêt et quels potentiels ?

On a précédemment relevé (Chap. II) le fait que la plupart des auteurs rendent compte de leur expérience de terrain, plus que d'un propos de nature théorique. Une expérience conditionnée très souvent par le caractère « urgent » de leurs interventions et par la faiblesse des moyens accordés aux projets de conservation de l'architecture de terre. On a ainsi repéré dans la littérature une tendance générale à rédiger des « recommandations » pour une perspective d'application immédiate, ou au mieux à court terme (2 ans). L'objectif étant de stabiliser les dégradations, de rompre les processus en chaîne qui sont à terme - parfois court lorsqu'un seuil de menace grave est atteint - très dévastateurs.

En 1984 (Colloque de Bruxelles déjà référencé), **Hughes** fait le constat qu'il n'existe que très peu de littérature documentant les projets de « rénovation » des bâtiments en terre. Ainsi, les opérateurs sont obligés d'expérimenter, d'inventer, de redécouvrir les techniques les plus appropriées, ou de chercher à bénéficier d'autres expériences. Pour l'auteur, le fait que chaque édifice est « unique » rend difficile la possibilité de transmettre des principes recteurs, des « recettes » pratiques. On constate en outre que le savoir-faire s'est perdu. Mais le plus important pour Hughes est de reconnaître dans l'éventail des techniques, simples ou complexes, celles qui « ne marchent pas ». Car il vaut mieux « bien faire » que « mal faire », les erreurs risquant d'être très préjudiciables pour l'avenir. Les interventions sur les bâtiments historiques peuvent terriblement affecter les structures de caractère historique. *Dans un tableau (n° 8) que propose l'auteur, nous relevons l'expression d'un point de vue très intéressant, qui est encore tout à fait actuel, même si les connaissances scientifiques ont évolué et si l'expérience s'est développée au cours de ces quinze dernières années, permettant justement de discuter le propos tenu par Hughes à la lumière des nouveaux acquis de la recherche.* Présentant un ensemble de 14 « domaines d'intérêts », l'auteur discute deux entrées de propos, sur un mode comparatif et sur trois niveaux d'appréciation (pauvre, correct et bon - pour la première entrée -, et, bas, moyen et haut - pour la deuxième). Cette approche permet de poser un cadre de recommandations générales. D'une part, la première entrée de propos, que l'auteur définit comme « l'état actuel des connaissances », en 1984, et d'autre part, la deuxième entrée, qu'il définit comme « le potentiel d'efficacité » pour garantir une bonne conservation. Nous reprenons ici ce tableau en discutant les 14 domaines d'intérêts.

1 - Techniques traditionnelles de construction

• Etat actuel des connaissances : bon. Potentiel d'efficacité : moyen. *Il semblerait ici, considérant la littérature disponible en 1984, que Hughes fasse davantage référence à un état des connaissances personnel plutôt que généralisé. Si l'architecture en terre commençait à être mieux connue, les*

techniques à proprement parler l'étaient moins et l'on observait encore des confusions sémantiques sur l'identification des techniques (adobe/vs/pisé/vs/bauge) dans une grande part de la littérature, notamment de nature archéologique où le vocable « pisé » tendait à désigner l'ensemble des vestiges bâtis en terre. Quant au potentiel d'efficacité, il convient de rappeler ici que la connaissance et la maîtrise de chaque technique, dans chaque contexte culturel concerné, est indispensable pour garantir une conservation de qualité qui aura sans doute à s'appuyer sur les savoir-faire locaux. On ne peut en effet intervenir de la même manière sur un patrimoine bâti en « maçonnerie » de terre (adobe, blocs, sod), en murs « monolithiques » (bauge, pisé) ou en structure « composite » (colombage, torchis, remplissages en boules de terre).

2 - Le bon usage et le mauvais usage de la structure

- Etat actuel des connaissances : correct. Potentiel d'efficacité : haut. Là encore à l'époque de cet exposé, la connaissance du comportement structural des bâtiments en terre n'était pas bien avancée et l'on sait que l'on ne dispose toujours pas, aujourd'hui, de bons outils de calcul des structures en terre qui seraient spécifiques, même si des tentatives ont été faites (prise en compte du rapport d'élancement, p.e.). Les ingénieurs structure, formés aux techniques de construction contemporaines (béton armé, acier, bois) sont en effet très souvent démunis. Quand au potentiel d'efficacité pour la conservation, il est certain que la connaissance du comportement statique des structures, des liaisons mécaniques des matériaux et systèmes construits, et l'exploitation des performances propres au matériau et aux structures en terre, sont indispensables.

3 - Les propriétés du sol

- Etat actuel des connaissances : bon. Potentiel d'efficacité : moyen. Oui, en 1984, les connaissances des propriétés étaient déjà assez bien établies dans la littérature mais selon une approche relevant davantage de la géotechnique que de la « construction » et de « l'architecture ». Quand au potentiel d'efficacité, on peut dire en effet qu'il peut être moyen car beaucoup de bâtiments traditionnels bâtis avec des terres qui ne sont pas toujours « idéales » peuvent garder un bon état de conservation selon le degré de qualité de la conception architecturale et de la mise en œuvre, et selon le degré d'usage et d'entretien. Expression efficace des « bonnes bottes et du bon chapeau ».

4 - Techniques de test des sols

- Etat actuel des connaissances : bon. Potentiel d'efficacité : moyen. La même remarque que précédemment s'applique à ce domaine d'intérêt pour l'état des connaissances. Quand au potentiel d'efficacité des techniques de test des sols, on peut aussi s'accorder avec l'auteur dans la mesure où il n'est pas « systématiquement » nécessaire de se référer à des tests sophistiqués pour identifier une bonne terre pour construire, et que les anciens ne disposaient pas d'une « science » mais d'un « savoir-faire ». Par ailleurs, la « science » de l'identification et de la caractérisation des terres a depuis lors été établie.

5 - Modification des sols existant in situ

- Etat actuel des connaissances : pauvre. Potentiel d'efficacité : haut. En effet, en 1984, la question de la modification des propriétés d'un sol n'était pas vraiment abordée, ni les possibilités techniques bien connues, à part dans le domaine de la stabilisation des terres pour les travaux d'infrastructure routière. Quant au potentiel d'efficacité pour la conservation, nous connaissons bien aujourd'hui et les limites et les intérêts de la stabilisation ou de la consolidation des matériaux qui n'ont pas toujours donné toute satisfaction ou qui ont pu aussi contribuer au « blindage » des bâtiments si ce n'est à des résultats

catastrophiques (genèse de nouvelles pathologies). Par ailleurs, l'emploi de ces produits peut contrarier le respect de l'authenticité et de l'intégrité des matériaux d'origine. Néanmoins, des pratiques contrôlées d'amendement en agrégats ou en matériaux végétaux peuvent donner d'excellents résultats. On reviendra spécifiquement sur cette question de la modification ou de la consolidation des terres, par la suite.

6 - Modification de nouveaux matériaux terreux

• Etat actuel des connaissances : bon. Potentiel d'efficacité : moyen. *L'ingénierie géotechnique garantissait à cette époque un bon niveau de connaissance sur l'utilisation de nouveaux types de sols. Mais, là encore, davantage pour les travaux d'infrastructure routière plutôt que pour la construction. Quant au potentiel d'efficacité, en matière de conservation, si l'on intègre bien le principe de l'intervention minimale, de la réversibilité et du respect de l'intégrité comme de l'authenticité, nous serions davantage inclinés à dire qu'il est « bas », ou pour le moins, souvent « illusoire ».*

7 - Traitement de surface des murs

• Etat actuel des connaissances : correct. Potentiel d'efficacité : bas. *Les enduits traditionnels sur les édifices en terre, principalement à base de chaux, étaient en effet bien connus. Moins bien l'étaient ceux à base de terre, amendée ou non en stabilisants végétaux et/ou hydrauliques, ou même en produits chimiques. Quant au potentiel d'efficacité on peut dire en effet que l'enduit n'est pas de première importance dans la conservation de sites archéologiques qui en sont dépourvus, sauf pour des traitements sous forme d'enrobage, de « capping » ou d'enduits de protection temporaires et réversibles, sacrificiels, alors qu'il peut l'être davantage dans la conservation de bâtiments historiques qui en sont pourvus et qui exige alors un savoir-faire de haut niveau. Nous rejoignons la question de la conservation des surfaces décorées qui sera développée par la suite.*

8 - Processus de dégradation

• Etat actuel des connaissances : correct. Potentiel d'efficacité : moyen. *Nous ne partageons pas le point de vue de l'auteur car, à cette époque, bien qu'il faille reconnaître l'expérience de quelques rares praticiens de la conservation de l'architecture en terre, les processus de dégradation au-delà de la seule phénoménologie et symptomatologie étaient encore très mal connus, particulièrement pour identifier les causes et établir un diagnostic clair. Nous l'avons suffisamment relevé dans le chapitre précédent. Quant au potentiel d'efficacité des processus de dégradation, nous sommes plus que jamais convaincus qu'il doit donc être considéré comme « haut » car il ne saurait y avoir de conservation de qualité sans connaissance des facteurs, des effets, des causes, c'est à dire sans énoncé d'un bon diagnostic. L'ingénierie ne peut pas prétendre ici résoudre tous les problèmes.*

9 - Effet de l'eau sur les toitures, les murs, le terrain

• Etat actuel des connaissances : bon. Potentiel d'efficacité : haut. *On peut ici s'accorder avec l'auteur, dans la mesure où la pathologie d'humidité est effectivement la plus dangereuse.*

10 - Entretien à long terme

• Etat actuel des connaissances : correct. Potentiel d'efficacité : moyen. *La question des pratiques d'entretien, du court au long terme, reste tout à fait essentielle et les connaissances dans ce domaine étaient, à notre sens, insuffisantes au début des années 80. La tendance était déjà celle qui a dominé par la suite, éviter d'avoir à faire de l'entretien et offrir aux « clients » potentiels*

une maison en terre restaurée aussi « solide » qu'une maison en matériaux contemporains (lesquels d'ailleurs n'excluent pas l'obligation d'entretien). Ou garantir aux gestionnaires de sites bâtis en terre le moins de charge d'entretien. Quant au potentiel d'efficacité de l'entretien, nous sommes plus que jamais persuadés qu'il est sans aucun doute le plus important, parmi tous les domaines d'intérêt relevés. L'intégration d'un système et d'un programme d'entretien dans tous les plans de gestion d'un site ou d'une architecture en terre est incontournable.

11 - Influences de l'environnement

- Etat actuel des connaissances : pauvre. Potentiel d'efficacité : moyen. Certainement, à cette époque la prise en compte des facteurs environnementaux était plutôt rare. On commençait à peine à voir poindre un discours pointant la nécessité de porter un regard plus large au-delà de la seule lunette sur le mur ou le matériau. Aujourd'hui, il apparaît de plus en plus que la prise en compte des facteurs environnementaux est aussi essentielle, et qu'il ne peut y avoir de conservation efficace sans apporter des réponses aux risques générés par les contextes physiques, climatiques et plus largement sociaux, économiques et culturels.

12 - Approche attentive du détail dans les travaux de réparation

- Etat actuel des connaissances : correct. Potentiel d'efficacité : haut. On peut en effet s'accorder avec l'auteur sur cet aspect très important car les pratiques de conservation, comme de restauration ou de construction en terre actualisées, en relèvent le caractère essentiel. Cette appréciation reste plus que jamais actuelle et l'état des connaissances doit sans doute être encore développé en la matière.

13 - Contrôle de l'usage futur du bâtiment

- Etat actuel des connaissances : pauvre. Potentiel d'efficacité : moyen. On peut s'accorder qu'au début des années 80, la prise en compte de l'usage futur du bâtiment conservé ou restauré, était loin d'être une priorité des professionnels. Cette attitude n'a d'ailleurs pas beaucoup évolué alors qu'on reconnaît davantage l'importance de cet aspect. Néanmoins, le potentiel d'efficacité peut en effet être considéré comme moyen car la vocation d'usage d'un bâtiment n'est pas si fondamentale que cela comparée à la seule nécessité de son usage, tout simplement. Ce sont en effet les bâtiments non utilisés, délaissés, qui souffrent le plus.

L'ensemble des « domaines d'intérêt » présentés par Hughes restent toujours actuels et essentiels. Mais, l'on voit qu'en quinze années d'évolution de la question de la conservation de l'architecture de terre, les centres d'intérêt et les niveaux d'exigence se sont déplacés. Ce qui pouvait être considéré comme un ensemble de recommandations essentielles à une époque, pourtant pas si lointaine, peut être aujourd'hui discuté et reconsidéré à la lumière de l'évolution des expériences et des savoirs.

III.2.3. - Quelles stratégies de conservation pour l'architecture de terre ?

Dans le cadre des « Rencontres Internationales pour la promotion du patrimoine culturel d'Avignon, France, (1986), **Hughes** proposait une communication sur la « sauvegarde des structures en terre ». dans laquelle on a repéré un chapitre consacré aux « stratégies de conservation » que l'auteur expose sous forme de directions considérées comme essentielles pour poser une bonne attitude de

réflexion préparant à l'intervention. Voici résumées, ces principales « stratégies » proposées par Hughes.

• **1 - L'usage continu :**

Les bâtiments en usage font l'objet d'un entretien régulier et de réparations périodiques. Leurs occupants savent quand il est nécessaire d'intervenir. Alors que les bâtiments non utilisés ne bénéficient d'aucune inspection régulière, ni d'entretien, et sont donc sujets au vandalisme et exposés à un processus de dégradation. Si le bâtiment est occupé, il peut être sujet à des transformations réalisées par ses occupants et peut donc changer de forme. Mais cela fait partie de son histoire et de son « caractère ».

• **2 - Contrôle de la fonction :**

Les structures en terre sont particulièrement sensibles à l'usage qu'on en fait. Dans le processus historique de changement de propriété, les usages peuvent évoluer et être à l'origine de processus de dégradation. Il est donc indispensable d'informer les occupants sur ce qu'il convient d'éviter dans les modes d'usage, avec, par exemple :

- a - l'emploi du rez-de-chaussée pour le séjour des animaux ou pour le stockage du purin et des engrais naturels ;
- b - l'installation d'équipements ou de mobiliers lourds dans les étages supérieurs ;
- c - l'ajout de superstructures ;
- e - la construction d'appentis ;
- f - l'insertion de nouvelles portes et fenêtres ;
- g - la création de nouveaux réseaux de plomberie ou d'électricité et leur inclusion dans les murs ou les sols ;
- h - le rajout d'équipements d'air conditionné ou de déshumidificateurs ;
- i - la création de trous ou fosses de stockage à proximité des murs des structures.

3 - Techniques traditionnelles de réparation :

Les occupants des maisons en terre sont en général très familiarisés avec les techniques d'entretien et de réparation. Mais les moyens manquent parfois pour réaliser un bon travail. L'important est de viser une réduction des coûts d'entretien. Parmi les actions à renforcer, l'auteur relève :

- a - réaliser une toiture « monolithique » ;
- b - réaliser un gradient de pente des toitures permettant un bon drainage ;
- c - réaliser des gargouilles dont la poussée hors du mur est suffisante pour évacuer l'eau bien au-delà du mur ;
- d - entretenir régulièrement les acrotères des toitures terrasses pour empêcher le haut des murs de se dégrader
- e - reboucher les trous et cavités dans les murs après les avoir bien nettoyés et avoir évacué le matériau friable ;
- f - Réparer les enduits délavés ou altérés ;
- g - remplacer les poutres en bois qui sont engagées dans les murs lorsqu'elles sont détériorées.

4 - Enduit « sacrificiel » à la base des murs :

Dans les régions humides ou lorsque l'on est en présence d'une nappe phréatique, lorsque le bétail vient uriner contre les murs, la base des murs peut être très fragilisée par la capillarité, par la présence de sels, par une érosion. Il est donc tout à fait indiqué de réaliser périodiquement, sur cette base des murs altérés un enduit « sacrificiel » qui peut être une sorte de plinthe protubérante. Mais ces enduits ne doivent pas être étanches.

5 - Enduits extérieurs de haute qualité :

Les enduits extérieurs des maisons de terre agissent la plupart du temps comme des enduits « sacrificiels » réalisés à partir du même sol que la maçonnerie mais modifié (tamisé, rajouté de paille), de façon à réduire la rugosité du mur, la microfissuration et l'absorption d'eau par le mur. Ces enduits doivent pouvoir être périodiquement entretenus ou remplacés si nécessaire. Mais leurs propriétés mécaniques et thermiques, différentes de celles du mur, font que ces enduits peuvent manquer d'adhérence, craquer ou gonfler. Il est donc tout à fait essentiel de bien contrôler leur mise en œuvre sur un support bien nettoyé, débarrassé de ses poussières et bien mouillé. Il est aussi essentiel d'utiliser des mortiers traditionnels et surtout pas de ciment.

6 - Réfection de l'ornementation :

Dans beaucoup de cultures, les murs sont décorés. Soit avec des peintures, soit avec des motifs en terre en relief, ou avec d'autres matériaux, bois, pierre, briques cuites. Cette ornementation joue un rôle social et culturel important mais aussi parfois un rôle fonctionnel. D'une manière générale, cette ornementation sert souvent à mieux contrôler le ruissellement de surface sur les murs. Elle sert à diviser le volume d'eau et à le ralentir, la quantité et la vitesse étant des facteurs importants d'érosion. De même cette ornementation peut contribuer à uniformiser l'absorption de l'eau.

7 - Contrôle du micro-environnement :

Les traits naturels et humains de l'environnement du bâtiment historique peuvent contribuer à affecter son intégrité. On peut ainsi intervenir sur divers facteurs :

- a - le nettoyage de la végétation qui peut contribuer à maintenir de l'humidité et à favoriser la présence d'une micro faune ;
- b - L'éloignement des plantations florales, arbustives ou agricoles qui contribuent aussi, par l'arrosage à maintenir l'humidité et ses problèmes. L'eau doit être canalisée au-delà des murs.
- c - l'exposition au vent qui peut, par un transport de poussières, de sable et autres matériaux, ou par incidence sur les pluies, contribuer à une érosion. Des interventions sur la topographie et des barrières végétales peuvent améliorer cet impact du vent.
- d - L'enlèvement d'objets qui sont stockés contre les murs, comme du bois, des outillages agricoles, peut contribuer à mieux contrôler l'humidité et l'évaporation des murs. Cela peut aussi contribuer à réduire la contamination par les insectes et la faune, la flore et les champignons.
- e - Dans l'environnement urbain, il n'est pas conseillé de réaliser des chaussées ou des pavements contre les murs en terre car ces éléments imperméables favorisent le rejaillissement et réduisent considérablement l'évaporation.

8 - Nouveaux matériaux :

Il est essentiel de ne pas réutiliser les anciens matériaux dégradés. En partie parce qu'ils présentent des propriétés altérées (manque de cohésion p.e.). Il faut si possible identifier la carrière originale de terre qui a été utilisée ou un type de sol de même qualité de façon à produire des matériaux qui seront les plus similaires possibles aux matériaux anciens. Mais l'on peut aussi améliorer les propriétés des terres locales (résistance, densité, porosité) si elles ne s'avèrent pas très bonnes par des mélanges de différentes fractions granulaires ou même en les stabilisant (adjuvants hydrauliques ou végétaux).

9 - Imprégnation du sol :

On peut introduire dans la terre des agents de cimentation ou des agents d'imperméabilisation. Mais ces produits ne doivent pas changer l'apparence des

matériaux. Cela peut se faire par imprégnation mais ces techniques sont souvent coûteuses à cause du prix des produits chimiques et des solvants, et du fait de l'importance des vides dans le matériau. Les expériences réalisées par pénétration des produits ont montré souvent leur inefficacité car il en résulte souvent la création d'une sorte de peau de surface qui pèle ou se desquame. De plus ces peaux étanches empêchent le matériau de respirer et peuvent conduire à des déformations plastiques. La technique de l'application des produits en badigeon ou barbotine par « *grouting* » (angl.) peut être très efficace si le mur est assez homogène. Car les cavités, les fissures, peuvent considérablement réduire l'efficacité de ces procédés.

10 - Couvertures :

Recouvrir des vestiges ou une partie d'un édifice en terre par un abri peut être efficace contre la pluie, le vent et contre l'ensoleillement direct. Mais ces structures, la plupart du temps ont montré qu'elles pouvaient aussi affecter d'autres conditions micro-environnementales. De plus, la question de leur esthétique et de leur coût peut être largement discuté.

R.E. Hughes rappelle en conclusion que la plupart des options de conservation qu'il propose sont applicable aux édifices en terre crue comme aux édifices en pierre ou en briques cuites. *Mais toutefois, il y a des différences quant aux réponses à apporter aux structures en terre par le conservateur qui doit être compétent dans certains domaines scientifiques comme la chimie, la mécanique des sols, et la dynamique des structures. Un mauvais diagnostic sur les types de terre à utiliser peut avoir de graves répercussions sur la conservation comme d'ailleurs une inspection visuelle peut être très insuffisante comparativement à d'autres structures construites en autres matériaux. Il demeure important de renouer avec les traditions culturelles, avec les méthodes et les savoir-faire ancestraux, pour le meilleur comme pour le pire.*

III.2.4. - Bien faire plutôt que mal faire

Toujours dans le cadre de sa communication présentée lors du colloque de Bruxelles, **Hughes** (1984, op. cit.) proposait un ensemble de conseils pratiques pour la « réparation » des bâtiments en terre. Il s'agit pour l'auteur de relever un ensemble « d'action bénéficiaires » et « d'actions à éviter », à différents niveaux de considération. *Le propos est particulièrement intéressant car il préconise des interventions visant à rétablir l'équilibre des matériaux, de la structure et de l'architecture du bâtiment, en renouant avec les cultures constructives traditionnelles. Le propos valorise « l'intelligence » constructive et le rôle « stabilisant » de l'architecture. Mais aussi la notion « d'équilibre » entre le bâtiment et son environnement. Nous reprenons ici les grandes lignes de ce propos qui doit être davantage rapporté à la conservation des bâtiments historiques plutôt que des sites archéologiques bien que certains aspects du propos soient également utiles pour ce faire.*

• Actions bénéficiaires

1 - Au niveau structural

- Vérifier les descentes de charges, dans les murs et les comparer aux calculs d'origine.
- Essayer d'assurer une répartition des charges homogène sur tous les murs.
- Réparer les murs endommagés en leur base.
- Débarrasser les murs de charges actives supplémentaires.
- Agir sur les déformations structurales : clés de liaison entre murs séparés, nettoyer les fissures et les reboucher avec un matériau identique à l'original.

- Si les déformations structurales ne peuvent pas être aussi simplement rectifiées, alors : contrôler les mouvements ; considérer avec précaution le degré de danger et la nécessité de démolir ; réaliser des contreforts dans un esprit compatible avec la structure ; considérer la possibilité de renforcer la structure (chaînage, tirants, pose de grillages, renforcements verticaux dans les murs).

2 - au niveau des matériaux de structure

- En introduisant de « nouveaux matériaux » dans la structure, vérifier que leur résistance et leur durabilité sont compatibles avec le matériau original.
- Avant d'introduire ces nouveaux matériaux, bien nettoyer les murs et éliminer les matériaux pulvérulents, bien mouiller le support et les nouvelles briques.
- Si l'on construit de nouveaux murs, utiliser des matériaux stabilisés qui sont clairement identifiables par rapport au matériau original.
- Remplacer les poutres détériorées ou pourries si de nouvelles charges doivent être appliquées, si la section originale des poutres a été réduite de 30 %, si l'ancrage des poutres dans le mur est inférieur à 30 mm, si des dépôts de pourriture sèche sont visibles.
- Traiter les bois en contact avec la terre, ou en situation d'accès difficile, ou en risque d'humidité, avec des produits préservatifs.
- Favoriser l'évaporation lente du sol.
- Compacter les toits- terrasses à l'état d'humidité optimale du côté « sec », de façon à limiter le risque de fissuration.

3 - Matériaux de finition, enduits

- Pour garantir un bon accrochage sur le mur-support, bien nettoyer le mur et évacuer les matériaux pulvérulents. Préparer la surface si nécessaire, en constituant une surface rugueuse, des stries ou des trous d'accrochage, et, éventuellement, poser un grillage. Enfin, bien mouiller le mur-support.
- Faire en sorte que les matériaux utilisés pour réaliser l'enduit présente des caractéristiques voisines du matériau du mur-support.
- Bien nettoyer les endroits où sont associées des surfaces verticales et horizontales (mur-sol par exemple), qui sont des situations très sensibles et très exposées.
- Lorsque la décoration murale a été détériorée, essayer autant que possible de la refaire car elle joue aussi d'autres rôles tels que le maintien de l'enduit sur les murs, la résistance aux vents abrasifs, la réapparition plus homogène du ruissellement de surface et la réduction de sa vitesse d'écoulement.
- Préférer de nouveau enduire avec des matériaux traditionnels plutôt qu'avec des matériaux nouveaux (ciment par exemple) qui sont incompatibles avec les murs de terre.

4 - Drainage

- Réajuster de façon homogène le gradient de pente des toitures plates qui doit être de 1/15 à 1/20 pour garantir un bon drainage de surface de la pluie.
- Réparer les acrotères et tous les murets de division des formes de toiture, qui sont de bonnes protections pour que l'eau ne pénètre pas dans les murs structuraux.
- Supprimer toutes dépressions sur les toitures qui pourraient devenir des cuvettes.
- Pour tous les toits, le drainage est essentiel et l'eau doit être collectée en des points spécifiques, soit par des gargouilles qui doivent la rejeter à l'écart du mur, soit par des descentes d'eau.
- Prévoir des tranchées de drainage à proximité de la base des murs qui évacueront l'eau loin des murs.

- Créer une forme de pente de drainage à la base des murs qui permettra de dévier le rejaillissement et d'évacuer l'eau de surface vers l'extérieur.

5 - Environnement local

- Considérer l'intérêt de planter des arbres pour réaliser des pare-vents mais à l'écart des murs.
- Maintenir les flux de population et d'animaux à l'écart des murs.
- Modifier les systèmes de drainage de façon à ce qu'ils évacuent l'eau au-delà des murs.
- Décourager la possibilité de développement d'une faune (insectes, rongeurs, oiseaux) au voisinage des murs et dans les murs.

6 - Généralités

- Utiliser les techniques originales lorsque c'est possible. Les matériaux et les méthodes modernes sont souvent incompatibles.
- Surestimer le degré des problèmes de structure et de matériaux ou utiliser un facteur de conservation plus sûr.
- Réaliser les travaux en ambiance d'ombrage plutôt qu'en ensoleillement direct, de façon à limiter le risque de fissuration et à amortir la contrainte thermique qui peut contrarier l'adhérence des matériaux de réparation sur le mur-support.
- Réduire au maximum les situations d'inaccessibilité pour les entretiens à venir.
- Eduquer les gens qui vont continuer à utiliser les structures de façon à ce qu'il réalisent un bon entretien et qu'il soient sensibles aux questions des modifications de la structure et du changement des usages.

• Actions à éviter

7 - au niveau structural

- Eviter d'appliquer à nouveau des charges sur les murs et les fondations qui n'en ont pas reçues depuis longtemps et lorsque les conditions du terrain ont changé. Veiller par exemple à ne pas introduire de nouvelles charges sur les murs avec de nouvelles poutres (plancher et charpente). Ou encore, éviter de construire un étage sur les murs existants sans avoir vérifié les propriétés des fondations et du sol.
- Eviter de créer des points « durs » dans les murs qui pourraient changer les caractéristiques structurales et causer des déformations.
- Eviter de creuser des trous dans le voisinage des murs car cela fragilise les fondations.
- Attention de ne pas évacuer les masses de matériaux au pied ou contre les murs qui pourraient remplir un rôle de contrefort.
- Il est préférable de contrôler les fissures pendant au moins un an avant de les reboucher.
- Eviter d'élargir les baies pour obtenir un meilleur passage ou davantage de lumière. Cela pourrait transformer la descente des charges et engendrer de nouvelles contraintes dans d'autres parties des murs.
- Eviter de créer une surface dure lorsque cette surface remplit un rôle structural.
- Eviter de supprimer des additions récentes sans avoir analysé leur rôle de support structural.

8 - Matériaux

- Attention à l'introduction de consolidants chimiques qui viendraient imperméabiliser la surface des murs et réduire leur perméabilité.
- Ne pas employer des liants hydrauliques tel que ciment et chaux ou autres stabilisants actuels sur les toitures car ces matériaux risquent de fissurer. Les

produits hydrophobants peuvent aussi réduire considérablement la capacité des murs à « respirer ».

- Eviter de réemployer un matériau ancien dégradé qui a pu perdre ses propriétés physico-chimiques originales et notamment sa cohésion.
- Ne pas employer des matériaux à forte teneur en composés organiques qui tendent à générer des effets acides et à détériorer les caractéristiques physiques et chimiques des sols.
- Ne pas renforcer avec des aciers (oxydables) qui pourraient aussi perturber l'équilibre chimique des matériaux originaux et leurs propriétés structurale.
- Eviter d'utiliser des blocs de terre comprimée lorsque la structure originale est en adobe.

9 - Matériaux de finition, enduits

- Eviter les enduits trop fins qui présenteront des caractéristiques d'expansion et de contraction thermique différentielle par rapport au mur-support.
- Eviter de reboucher partiellement les enduits et préférer refaire de plus grandes surfaces car l'adhérence de ces réparations n'est pas garantie et pourra générer des voies d'eau depuis la surface.

10 - Drainage

- Ne pas favoriser la pénétration de l'humidité à la base des murs.
- Ne pas insérer des équipements d'air conditionné qui peuvent générer des condensations et donc une concentration d'humidité.
- Eviter d'introduire des systèmes de drainage dans l'épaisseur de la base des murs car le moindre mouvement structural pourra causer des dommages importants.
- Eviter de faire des tranchées de drainage trop profondes, remplies de graviers, au voisinage des murs en présence de remontées de la nappe phréatique. Car cela pourrait réduire la capacité portante des sols sous et au voisinage des fondations.

11 - Environnement

Si le bâtiment est construit sur des sols cohésifs, alors, éviter :

- de rabaisser le niveau de la nappe phréatique par pompage ou par la réalisation de tranchées de drainage ; car il faudra alors de nouveau consolider les sols ;
- de couper les arbres qui sont situés à une distance équivalente à 2,5 fois leur hauteur ; cela pourrait générer des mouvements du sol avec des répercussions sur les fondations ;
- de réaliser des plantations florales ou arbustives trop près des murs car leur arrosage peut contribuer au maintien d'une ambiance humide et à réduction de la résistance du sol.

12 - Généralités

Il est en général conseillé d'éviter :

- les méthodes et interventions radicales ;
- des changements structuraux majeurs ;
- de ne pas affecter un nouvel usage aux structures réparées ;
- de surcharger les murs par des charges nouvelles et trop lourdes d'équipement ménager ou mobilier.

*Le propos développé par Hughes demeure entièrement actuel et sera repris par plusieurs auteurs au cours de ces quinze dernières années. Par exemple, nous avons relevé une formulation plus récente de ce propos, par l'Association pour la Construction en terre de Nouvelle-Zélande, **EBANZ**, qui publiait en novembre 1997, un bulletin d'information couvant la problématique de la conservation des*

bâtiments en terre historique. Le propos complète celui de Hughes sur d'autres aspects non couverts et prend clairement acte des dispositions philosophiques et éthiques établies par les chartes internationales ou nationales de référence qui ont été publiées depuis lors.

1 - Attitude générale

Au delà de la nécessité de réaliser un relevé de l'état associé à une recherche sur les causes des dommages observés, dans l'objectif d'éliminer les sources des problèmes (cf. Chapitre II), les auteurs de cette plaquette publiée par EBANZ posent un ensemble de considérations générales sur la « problématique » de la « réparation ». Parmi ces considérations on a plus particulièrement relevé :

- la nécessité de considérer le bâtiment en terre et sa structure comme un « tout » ; car toute modification apportée à une partie peut affecter d'autres parties de l'édifice ;
- la réalisation de réparations qui soient compatibles avec les systèmes structuraux et avec le matériau ;
- l'obligation de reconstituer l'histoire du bâtiment ;
- le principe de l'intervention « minimale » ;
- garantir une bonne liaison entre les réparations et les structures et les matériaux d'origine ;
- garantir des intervention à effets « durables » ;
- privilégier l'emploi de matériaux originaux ou similaires ;
- la possibilité d'employer de « nouveaux » matériaux mais alors qui soient « identifiables » ;
- préférer la stabilisation du matériau terre à la chaux plutôt qu'au ciment ;
- garantir une homogénéité de comportement entre le matériaux et les structures d'origine et les interventions nouvelles (problèmes de la perméabilité à la vapeur d'eau, de l'expansion et de la contraction thermique, comportement différentiel à l'humidité et au gel-dégel, densités différentielles entre les matériaux d'origine et les nouveaux matériaux) ;
- éviter la réalisation d'enduits imperméables car les murs de terre sont comparables à la « peau humaine » et doivent respirer ;
- adopter en intervention transitoire de « préservation » des mesures « réversibles » ;
- bien documenter les techniques de conservation mises en œuvre et assurer un « monitoring ».

2 - L'évaluation des réparations

Une évaluation est indispensable pour identifier les « facteurs déstabilisants » de façon à les traiter : la pluie, la neige, les remontées capillaires importantes, l'action des animaux, l'état du drainage et de la toiture, la ventilation régulière du bâtiment par l'ouverture des baies, l'utilisation d'un chauffage intérieur, l'évacuation de la végétation de la base des murs, l'évacuation de l'eau à la base des murs par des pentes de drainage, la réalisation de drains périphériques, la réalisation de barrières végétales qui ne doivent pas bloquer l'ensoleillement. Autant de facteurs qui seront sujets à un « entretien » pour garantir l'efficacité des traitements.

3 - la prise en compte du climat

Dans le contexte néo-zélandais évoqué, les auteurs conseillent d'entreprendre les réparations pendant la saison sèche, hors pluie et hors gel, c'est à dire plutôt en automne et/ou au printemps. Il faut aussi éviter la conditions d'assèchement trop rapide à cause du vent de nord-ouest. Les interventions doivent être protégées de la pluie comme du soleil car le séchage des matériaux doit être

progressif et lent pour éviter les fissurations. Favoriser une bonne cure de séchage des matériaux.

4 - Le mélange des terres

Les terres utilisées en réparation doivent être aussi proches que possible des matériaux d'origine. Il faut donc analyser ce matériau d'origine pour déterminer les constituants du nouveau matériau. Ce nouveau mélange peut incorporer de la paille hachée, de l'herbe d'hiver, des touffes d'herbes ou des graines, selon la composition originelle. Si l'expérience montre que l'ajout de graines est difficile, ce n'est pas le cas pour l'ajout de sable ou de petites pierres. L'ajout de sable améliore la capacité d'absorption d'eau du mélange qui doit surtout conserver sa plasticité tout en étant le plus sec possible (contrôle du retrait au séchage). Le mélange doit être très homogène et si, traditionnellement, il se fait à la main, on peut, pour de grosses quantités, prévoir l'utilisation de malaxeurs. Mais le mélange à sec est une première étape indispensable. Il faudra prévoir d'adapter les malaxeurs traditionnels à béton notamment pour les pales qui doivent résister davantage à l'abrasion.

5 - Les traitements de surface

Si les murs ont été laissés sans enduits, historiquement, il est préférable de les laisser tel quel. S'ils étaient enduits, alors il faut autant que possible reproduire la même qualité d'enduit. Les enduits « durs » sont totalement inadaptés. Ils pourront affecter la surface des murs à cause d'une expansion thermique et chimique différentielle. De plus, un enduit imperméable, bloque l'évaporation de l'humidité et contribue à générer des poches d'humidité à l'interface du mur de terre et de l'enduit. L'action du gel sur ces poches est désastreuse. Si des enduits au ciment existent il vaut mieux alors les enlever et les refaire en appliquant des techniques originales.

6 - Les badigeons à la chaux

Les édifices anciens ont pu être badigeonnés à la chaux qui étaient périodiquement renouvelés pour protéger les murs. Il vaut mieux alors utiliser les mêmes principes car même des peintures modernes perméables à la vapeur d'eau peuvent occasionner des dommages du fait qu'elles piègent une partie de l'humidité. Mais ces badigeons à la chaux qui protègent le mur des agressions du climat devront être entretenus régulièrement. Pour réaliser un bon badigeon, il faut brosser les murs pour les débarrasser de toute poussière puis bien les humidifier. Ces badigeons doivent être minces, car trop épais, ils fissurent. La première couche doit bien pénétrer dans le mur et cacher les fissures. La deuxième couche donnera l'apparence finale de la couleur. Il existe deux types principaux de badigeons à la chaux. Ceux à base de chaux hydratée (livrée en poudre), facile à utiliser, et ceux à base de chaux vive naturelle qui demandent plus de précaution de préparation et d'emploi. On peut rajouter du suif ou de la graisse de mouton à la chaux vive, durant le processus de cuisson, pour améliorer la protection à l'eau.

Réparer les édifices en bauge et en pisé

L'exposé qui suit est de caractère généraliste mais conserve toute sa valeur introductive pour ce chapitre. Il sera complété par d'autres contributions plus détaillées, par la suite.

7 - Réparation des façades détériorées

Tous les matériaux manquant d'adhérence ou pulvérulents doivent être évacués. Les parties de murs restaurés doivent pouvoir supporter la charge du mur qu'elles soutiennent. Il peut donc être nécessaire de poser des étais ou des

clés structurales provisoires. Notamment pour les murs en terre les plus fins (30 cm).

8 - Rebouchage

Les parties à reboucher doivent être bien humidifiées, progressivement et par aspersions successives et à basse pression, pendant plusieurs heures. Le mur doit être humide à une profondeur de 20 à 30 cm. L'humidité du support doit être équivalente à celle du mortier de réparation. Il faut travailler à l'état plastique pour garantir une bonne adhérence et une bonne intégration. Néanmoins il faut veiller à ce que le mur ne soit pas trop saturé car il pourrait se désagréger. Pour réparer les murs en bauge, il est préférable de le faire à la main en couches successives jusqu'au nu du parement. Pour réparer des murs en pisé, on peut utiliser des blocs préformés. Pour des cavités plus profondes (50 cm), il est préférable d'utiliser un coffrage provisoire, en planches bien fixées. Ce coffrage provisoire n'est enlevé que lorsque le mélange a bien séché. L'utilisation de blocs est préférable pour les grosses cavités. Ils sont bâtis comme une maçonnerie en briques de terre (adobes).

9 - fissures

Les fissures dans les murs en bauge ou en pisé ont diverses origines. Elles sont propices à des infiltrations d'eau. Si on les recouvre avec des enduits imperméables, on risque d'accélérer les détériorations du fait de la rétention de l'humidité piégée dans les fissures. Il faut donc réparer les fissures en les remplissant avec des mortiers compatibles avec les matériaux d'origine.

10 - Tassement à la base des murs

Les soubassements en pierres des maisons en terre peuvent avoir opéré un tassement et être fissurées. Si le dommage est stabilisé, il suffit de reboucher les fissures et les dégradations (lacunes) apparentes, en utilisant les mêmes matériaux que ceux d'origine. Si le problème est plus grave, avec un ventre apparent, il est alors préférable de démonter la partie de soubassement affectée et de la reconstruire, en s'assurant que la partie reconstruite est édifiée sur un sol ou sur des fondations solides, tout en s'assurant que le sol est bien sec.

11 - faiblesse des linteaux

Il convient de faire très attention lorsque l'on doit réparer des linteaux affaiblis de façon à ne pas provoquer un effondrement du mur soutenu. Des étais sont indispensables.

Réparation des murs en briques de terre

Il s'agit de réparer des murs en « maçonnerie ». Selon ce principe, des « coutures » locales ou des rebouchages sont assez faciles à réaliser. Il peut être nécessaire de mouler de nouveaux blocs qui seront alors bâtis dans les murs à restaurer de la même manière que l'on peut réparer des murs en bauge avec des blocs préformés. La préparation du support, la mise en place des blocs et les finitions répondent aux mêmes principes de mise en œuvre. Il est préférable d'évacuer les blocs anciens détériorés et leur mortier de pose, pour les remplacer par de nouveaux blocs et par du nouveau mortier. Il faut utiliser autant que possible de la terre locale préparée par tamisage (évacuation des grosses pierres et des résidus organiques), à la granulométrie adéquate, et bien contrôler la teneur en eau pour éviter le retrait. Une cure de séchage progressive et lente des briques de terre fraîchement moulées, protégées par des sacs humides, est préférable. On admet comme consensus général que le mortier de pose doit être de la même qualité que le mortier ayant servi à produire les briques de terre. Mais l'on peut prévoir d'y ajouter de la paille ou du

sable pour améliorer son ouvrabilité et contrôler le retrait. Faire des tests de mélange de mortier au préalable pour préciser les dosages en constituants, notamment en argile et en sable. On peut coller deux blocs frais de mortier test entre eux (sandwiches) et observer leur comportement au séchage. L'absence de fissuration à leur liaison est un critère de contrôle de la qualité du mélange. Lors de la réparation, les blocs devront être bâtis bien horizontalement et les joints horizontaux comme verticaux bien bourrés de mortier de pose.

Réparation des édifices en colombage et en torchis

La réparation des composants en terre des édifices à colombages est similaire à celle des autres bâtiments en terre. Mais leurs murs sont plus fins et peuvent avoir subi des déformations substantielles. Les poutres de bois peuvent être très affectées par l'humidité et doivent être remplacées par des qualités de bois similaires.

Réparation des édifices en « sod » (mottes de gazon)

Les principes sont identiques à ceux des maisons en adobe. Le matériau de réparation est constitué de blocs de « sod » découpés dans le sol (mottes de forme réglée), de mêmes dimensions que les blocs originaux.

Entretien et inspection régulière

L'entretien régulier est essentiel pour garantir la préservation des bâtiments historiques en terre. Un plan d'entretien cyclique doit être établi prévoyant des inspections régulières, un contrôle et un suivi des changements visibles dans les matériaux et la réalisation d'interventions visant à traiter les problèmes observés. Ce cycle d'entretien peut être entrepris selon une périodicité différente bien que ce soit plus facile pour un édifice occupé qu'inhabité. La périodicité des inspections peut être journalière, hebdomadaire, mensuelle, trimestrielle ou bisannuelle, et doit être adaptée selon les circonstances.

III.3. - Le contrôle de l'environnement

Nous avons relevé toute l'importance de la prise en compte de l'environnement de l'objet architectural sur lequel on est amené à intervenir. Quelques rares auteurs développant plus particulièrement ce propos ont retenu notre attention, bien que ces contributions demeurent plutôt « généralistes ». Cette question du contrôle de l'environnement mériterait donc d'être développée par des recherches futures.

Hughes (1986, séminaire d'Avignon, op. cit.), évoque la question du contrôle du « micro-environnement ». L'activité humaine, dans et autour des structures historiques en terre, peut contribuer à leur dégradation. Il convient, en général, de garantir l'existence d'un environnement « uniforme » autour de ces structures bien que cela soit difficile, compte tenu des expositions différenciés des façades au climat (zones de soleil et d'ombre, p.e.). Il est cependant possible d'intervenir sur différents facteurs, comme son propos précédemment présenté (cf. III.2.), le rappelait : désherbage, débroussaillage, interventions sur l'exposition, évacuation des matériaux du voisinage immédiat, optimisation de l'évaporation.

Dans le cadre de la réalisation d'une expertise d'une maison privée en pisé, située dans le Dauphiné (France), **Th. Joffroy et P. Odul**, (1989), au-delà d'un relevé de l'état et d'un diagnostic des problèmes posés, donnent un ensemble de recommandations pour le traitement des pathologies d'humidité affectant le bâtiment. On aura relevé notamment des recommandations concernant l'environnement du bâtiment et ses abords. On retrouve ici les principales dispositions connues permettant de contrôler le risque d'humidité, comme, la réalisation d'un drainage superficiel du terrain conduisant les eaux de pluie le plus loin possible du bâtiment, la création d'un nouveau « puits perdu » en remplacement d'un puits défectueux et situé trop près du bâtiment. Mais aussi la modification des pentes du terrain à la périphérie du bâtiment pour drainer les eaux de surface et les conduire dans des rigoles, ainsi que la mise en place d'un réseau de canalisations, avec des regards, transportant les eaux pluviales et les eaux usées vers ce puits perdu. Ces interventions sur l'environnement incluent aussi la suppression d'un chéneau en béton et d'un petit trottoir situés le long d'une façade, en les remplaçant par un drain à galets et graviers. Mais aussi, le nettoyage de tous les abords des murs en partie encombrés par des dépôts de bois de chauffe.

III.4.- L'entretien

*La plupart des auteurs révisés relèvent la nécessité de rétablir ou de réaliser un entretien qui fait partie du système d'équilibre des architectures de terre dans leur environnement social et culturel. Beaucoup d'auteurs sont tout à fait conscients du rôle essentiel des pratiques d'entretien pour garantir la durabilité des ouvrages, au-delà d'une phase de préservation qui mobilise des interventions de conservation préventive visant à stopper, ou pour le moins à ralentir, les processus de dégradation. Mais, au-delà de cet « conscience » de la question de l'entretien, peu d'auteurs développent finalement un propos spécifique élaboré, en terme théorique et en terme de définition ou proposition de « systèmes » ou de « modèles » d'entretien qui, on le sait, font souvent défaut. Sur les terrains, l'entretien est pratiqué à la mesure des mobilisations possibles, en moyens humains, matériels et financiers disponibles. Ainsi, après avoir bénéficié d'actions de stabilisation, des sites ont pu être complètement laissés à l'abandon, sans entretien (cf. **G. Chiari**, 1990, à propos du site de Tell'Umar, Irak). Néanmoins, on peut remarquer que les quinze dernières années auront contribué à une meilleure intégration de l'entretien, dans la définition des projets de conservation comme dans leur mise en œuvre. Après avoir passé une période où l'on a pu croire en la possibilité de mettre en œuvre des solutions de caractère « définitif », ou pour le moins « le plus durable possible », il a bien fallu constater que les interventions « dures » ont été souvent dramatiques et que l'on ne pouvait pas se passer d'entretien. Plus encore, l'équation intervention minimale ou « douce » ajouté à l'entretien, vient à être plus largement adoptée. Mais, la question, pour beaucoup de propriétaires d'édifices en terre, de maîtres d'ouvrage et de gestionnaires de projets de conservation de sites ou d'édifices historiques en terre, reste encore de savoir comment limiter la charge d'entretien, en mobilisations humaines, matérielles et financières. Ce point de vue est tout à fait légitime et « réaliste ». Pourtant, selon les contextes d'intervention, l'entretien peut être aussi générateur d'une plus value économique, sociale et culturelle, en terme de contribution à une politique de développement durable du patrimoine. Nous avons relevé quelques contributions sur la problématique de l'entretien qui méritent d'être présentée dans cette révision littéraire. On doit néanmoins noter qu'il y a encore et plus que jamais matière à produire, en terme théorique, sur cette question de*

l'entretien, pour le bénéfice des opérateurs et des patrimoines conservés. La définition de « modèles » ou de « systèmes » d'entretien demeure plus que jamais indispensable et doit retenir davantage l'intérêt de la communauté des opérateurs.

III.4.1. - Entretien courant, mise en état de risque minimum

Concernant le projet de conservation de la « *Our Lady Of Seven Sorrow Cathedral* », Navrongo, Ghana, **Th. Joffroy, D. Savage, M. Kwami et S. Moriset**, (1997), font état des pratiques d'entretien qui ont été réalisées par Soeur Bernadette (70 ans), assistée d'enfants et de femmes de la communauté locale. En fait, les auteurs remarquent que ces travaux d'entretien ont été inspirés par ce qu'ils faisaient sur leurs habitats familiaux, lorsqu'ils étaient jeunes. Soeur Bernadette inspecte la cathédrale toutes les semaines, les jours de nettoyage, généralement les mercredis et les samedis. Le nettoyage régulier inclue le dépoussiérage, l'enlèvement des excréments de chauves-souris, et l'inspection des trous de guêpes ou des galeries creusées par les termites. Ces cavités sont traitées au kérosène qui semble efficace pour quelque temps. Cependant les termites demeurent et peuvent causer de graves dommages, surtout pour les parties décorées. Pendant la saison des pluies, un gros travail de désherbage et de débroussaillage est réalisé autour du bâtiment, dès leur pousse. Les sols sont régulièrement réparés en bouchant les trous avec un gravier latéritique et en faisant une couche de finition avec un mélange de bouse de vache et de « *dawa-dawa* » (*décoction d'une gousse de « locust bean » donnant le jus de néré agissant comme stabilisant. Ce procédé est très utilisé dans les pays d'Afrique sub-saharienne. On le repère aussi au nord du Nigéria (pays Haoussa), et au Niger.* Les décorations ont été régulièrement entretenues par des femmes spécialisées de Navrongo, mais ces entretiens n'ont pas toujours été bien faits et sont très repérables. Les toitures-terrasses des trois petites tours de la façade de la cathédrale sont entretenues tous les 2 à 3 ans, en appliquant une couche de « *dawa-dawa* », mélangée à la bouse de vache. Les drainages périphériques du bâtiment sont entretenus de temps à autre, en posant des pierres inclinées à la base des murs. Les charnières des nouvelles menuiseries de fenêtres sont entretenues par un charpentier.

Dans leur « Guide d'entretien » concernant la conservation des Palais Royaux d'Abomey (Projet PREMA-BÉNIN II), **Th. Joffroy et S. Moriset**, (1996), prenant en compte la nécessité de s'adapter « au maximum » aux moyens dont dispose le Musée d'Abomey et de la Direction du Patrimoine du Bénin, relèvent toute l'importance d'efforts à déployer sur la « préservation » et sur « l'entretien ». Il s'agit pour les deux architectes d'établir « un état de dégradation minimal », de façon à stopper l'évolution des dégradations en cours et d'empêcher l'apparition de nouvelles dégradations. *Les réflexions nécessaires sur la préservation de « l'authenticité » des matériaux et autres éléments signifiants et sur « l'intégrité » du site, sont volontairement mis de côté, mais, provisoirement, en attente de pouvoir développer des recherches complémentaires qui ne doivent pas pour autant empêcher d'intervenir le plus rapidement possible pour assurer une préservation de l'état.* Pour les auteurs, « la conservation des Palais Royaux d'Abomey suppose :

- la mise en place d'un personnel suffisant ayant des responsabilités et des compétences complémentaires ;
- la responsabilisation du personnel d'entretien ainsi que de l'ensemble du personnel du musée ;
- la mise à disposition d'outils et d'équipements adaptés ;
- la mise en place d'un cycle régulier de visites permettant d'établir périodiquement un état des lieux ainsi qu'un plan d'action ;

- la mise en œuvre de travaux permettant de faire face à des situations d'urgence ;
- la mise en œuvre progressive de travaux permettant de mettre le musée en situation de risque de dégradation minimum ;
- la mise en place d'un protocole d'entretien. »

Passons en revue plus détaillée les propositions des auteurs.

1 - Visites régulières et planification des travaux

La mise en place d'une procédure de planification des travaux devant pallier les risques de dégradation passe par une procédure de visites régulières. Ces visites permettront d'identifier et d'évaluer les risques de dégradation, de définir des priorités d'intervention et donc d'établir un plan d'action. Il s'agit à la fois d'un programme de « visite trimestrielle » et de « visites régulières ». Les visites régulières, au rythme mensuel, permettent un contrôle permanent et peuvent être plus fréquentes en saison des pluies (2 par mois). Les visites trimestrielles constituent une analyse de l'état périodique de l'ensemble du site (bâtiments et environnement), et doivent permettre d'établir un diagnostic des problèmes, sur la base d'une identification de leurs circonstances et de leurs causes. Ce programme de visites peut être augmenté de « visites exceptionnelles » (en cas d'événement climatique majeur), et de « visites informelles », réalisées sous la responsabilité des personnels qui peuvent ainsi s'investir davantage sur la préservation et l'entretien du site.

Ce protocole de visites doit permettre, à partir des données recueillies, d'établir un ordre de priorité pour des interventions à réaliser, en fonction de l'évaluation du degré de risque des situations repérées. La planification des travaux est liée à la définition d'un « plan d'action ». L'ensemble des observations et des interventions réalisées doit être systématiquement enregistré sur un cahier. Celui-ci fournit une lecture simultanée des dégradations observées, de leurs causes, des réparations à effectuer, de leur niveau d'urgence, et une description des travaux exécutés. Cette accumulation d'information et d'expérience critique conduira à améliorer les méthodes d'intervention.

- L'entretien

L'entretien vise deux objectifs principaux :

- le maintien de l'état de risque de dégradation minimum ;
- le maintien d'un aspect correct permettant une présentation du site au public.

Cet entretien consiste en des tâches répétées à des intervalles réguliers, plus ou moins longs, selon les saisons, selon les types de tâches. Mais l'entretien devrait être un « réflexe quotidien », parfois fondé sur des gestes simples : ramassage de déchets, arrachage de plantes, destruction d'une galerie de termites, tous petits travaux pouvant réduire la charge de travail. Ainsi, on repère dans ces tâches, le balayage, le sarclage et l'élagage, le débroussaillage, le remplacement d'éléments de charpente attaqués par l'humidité, le traitement des champignons et des termites, le traitement des bois, la réparation des tôles et le traitement antirouille, le colmatage des fissures d'enduits et de murs, la reprise ponctuelle des enduits dégradés, le badigeonnage et la peinture des murs, l'entretien des menuiseries (nouvelle fixation, peintures et vernis), l'entretien des sols, le nettoyage périodique des bas-reliefs. Mais aussi, l'entretien des équipements et de l'outillage pour que les travaux puissent être réalisés dans de bonnes conditions.

III.4.2. - Stratégies et plans d'entretien

Dans son mémoire de CEAA-Terre, consacré à la question de la réhabilitation du patrimoine architectural en briques crues de Sardaigne, Italie, **A. Baldussi** (1994) aborde la question de l'entretien comme faisant partie intégrante du maintien de l'équilibre original des édifices. Le fait qu'il n'existe plus aujourd'hui en Sardaigne une pratique vivante de cet entretien traditionnel expose davantage les bâtiments à la menace de ruine. L'auteur se réfère à un livre de Alessandro Tiveron, « *La Manutenzione, un problema per l'edilizia* », (1990) qui donne un éclairage sur les termes du problème de l'entretien, sur ses significations techniques, mais aussi sur des questions administratives et de gestion, d'approches diversifiées des entreprises appliquant différents modèles de « systèmes » d'entretien. **Tiveron** repère plusieurs stratégies d'entretien.

1 - l'entretien « a posteriori », ou après dommage :

L'entretien est réalisé après l'apparition ou le développement de problèmes ou de pathologies, il peut alors consister, selon l'ampleur du dommage, à des reconstructions.

2 - l'entretien préventif :

Il s'agit d'une série d'interventions ayant pour but de prévenir différents types de dommages potentiels ou même d'événements accidentels, en travaillant sur les données techniques, scientifiques et historiques des édifices, prédéterminées, et sur son environnement.

3 - L'entretien « prévisionnel » :

On recherche le même résultat qu'avec l'entretien préventif mais en travaillant sur des « valeurs de l'état », plutôt que sur des données prédéterminées, et en utilisant des techniques plus élaborées de « monitoring ».

4 - L'entretien « opportuniste » :

Il s'agit d'interventions qui profitent d'occasions déterminées par différents événements, en prévoyant la réalisation d'interventions concomitantes dont l'économie est uniquement vérifiée sur la base du coût total maximal.

Si ces stratégies sont tirées de recherches faites dans le secteur industriel, et si l'on sait que la plupart du temps, dans le bâtiment, la stratégie d'entretien la plus fréquente est celle « a posteriori » ou « à rupture », Tiveron fait plusieurs observations. Il existe en effet un premier niveau de difficulté objective à prédéterminer « l'obsolescence » car les composants spécifiques d'un système (bâtiment), face à des mutations ou des événements externes, peuvent se comporter très différemment. Par ailleurs il existe aussi un autre niveau de difficulté qui est l'incertitude ultérieure permettant de bien cerner les conséquences produites dans le système par la perte de capacité de prestation des composants. En conséquence de cette complexité, la recherche de solutions est elle-même complexe et peut conduire à des solutions variées et adaptables aux événements. Il est donc nécessaire de définir des projets d'entretien qui définissent les modalités d'actualisation des interventions. Tiveron finit par proposer le principe d'une adjudication sur projet d'entretien en deux parties. D'une part des interventions d'entretien « conservatoire », ou d'entretien « ordinaire », au forfait, de manière à garantir l'exécution de travaux de « maintien ». D'autre part la gestion prévue d'un entretien « extraordinaire » répondant aux exigences des événements, avec si nécessaire, des travaux de « rénovation » à la mesure des problèmes posés. Mais ce principe d'entretien à double niveau doit être guidé par un cahier des charges de travail minutieusement établi et doit reposer sur une véritable « culture d'entreprise »

de l'entretien et sur des modalités de contrôle de l'exécution pour l'ensemble des parties concernées (le propriétaire, le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre, l'entreprise).

Tout projet de réparation d'une structure ancienne en terre doit faire l'objet d'un plan d'opération. Cette disposition est relevée comme essentielle par **Hughes** (1984, op. cit.) qui présente un diagramme structurant ce type de plan en cinq phases successives :

- 1 - le relevé (collecte des données) ;
- 2 - l'analyse (matériaux et structure) ;
- 3 - la recherche (expérimentation et conception du projet) ;
- 4 - les travaux (spécifications, supervision, contrôle de la performance et contrôle de la structure) ;
- 5 le rapport (comprenant la conception d'un programme d'entretien).

Dans ce diagramme, on peut situer toute l'importance d'un processus constant d'évaluation/ré-évaluation des dommages causés aux matériaux et à la structure des édifices. Ainsi chaque nouvelles phase de développement de ce plan d'opération ne doit être engagée qu'après avoir évalué la phase précédente. Ce plan relève aussi la nécessité de bien comprendre les processus de déformation. Enfin Hughes montre aussi combien les activités de « monitoring », poursuivies au-delà du chantier, sont indispensables pour garantir le développement d'une stratégie future d'entretien. Hughes fournit alors une liste des principaux faits qui affectent directement l'importance et la qualité de cet entretien, faits qu'il convient de bien savoir apprécier pour pouvoir aussi anticiper sur d'éventuelles actions de conservation qui permettront de contenir les risques de détérioration et garantiront une bonne stabilité structurale de l'édifice. Nous restituons ici cette liste de faits qui, selon l'auteur, affectent l'entretien des édifices en terre :

- les types de matériaux ;
- l'interaction des matériaux ;
- la durabilité des matériaux ;
- la capacité d'utilisation des matériaux en fonction de leurs avantages ;
- la structure, la forme et les détails ;
- la protection contre les influences internes ;
- la sensibilité de l'usage ;
- les extensions incompatibles ;
- les altérations ;
- le changement d'usage ;
- l'évolution des influences externes ;
- la qualité de l'environnement interne ;
- le temps passé sans réparation ;
- la compétence des réparateurs ;
- le niveau de priorité donné aux réparations ;
- l'âge et les ressources du propriétaire ;
- la facilité d'accès à des points reculés du bâtiment ;
- les moyens techniques pour découvrir les parties cachées ;
- les réparations antérieures de mauvaise qualité ou incompatibles ;
- le réemploi de matériaux dégradés ;
- des revêtements provisoires cachant de sérieux problèmes ;
- le degré d'abandon ;
- la fréquence des visiteurs.

En annexe de leur rapport d'évaluation du site de Pueblo Grande, **Todd R. Metzger, Larry Nordby et Jim Trott** (1988, op. cit), présentent un ensemble de fiches destinées à développer des activités de stabilisation en passant par les étapes suivantes :

- d'une part, le pré-diagnostic fondé sur un relevé de l'état et sur une description de la ressource architecturale.
- d'autre part la définition et l'organisation des tâches de stabilisation de la structure et des matériaux utilisés.
- enfin, la procédure de contrôle (« monitoring ») et d'entretien courant.

Une fiche couvre la définition et l'organisation des activités générales de stabilisation prenant en compte les mobilisations de main d'œuvre. Les principaux aspects couverts sont :

- la fourniture et l'organisation de l'équipement ;
- la documentation du site ;
- l'approvisionnement en matériaux de stabilisation (mortier, eau, etc.) ;
- les procédures quotidiennes de stabilisation ;
- le nettoyage du site ;
- des points divers ou autres.

Cette fiche est accompagnée d'une fiche personnalisée qui rend compte de façon descriptive des tâches précisément exécutées par chaque membre du personnel travaillant sur le site sur ces activités de stabilisation.

Viennent ensuite des fiches beaucoup plus détaillées concernant d'une part les activités de stabilisation des structures, où l'on repère les points suivants :

- documentation de la structure pour les quatre façades et pour l'intérieur comme pour l'extérieur en rendant compte du temps passé ;
- la préparation des matériaux de stabilisation, pour les mêmes situations ;
- la préparation du travail ;
- les activités de stabilisation elles-mêmes ;
- le travail de nettoyage et de rangement du chantier.

Ces fiches sont complétées par des quantitatifs de matériaux pour réaliser les tâches de stabilisation, notamment pour les mortiers (en fonction des différentes tâches), pour les sédiments utilisés (sable de ré-enterrement, graviers de drainage, etc.), et pour l'eau, et toujours en fonction des différentes façades. Le même principe est adopté en ce qui concerne les activités de stabilisation structurale des maçonneries et notamment pour le quantitatif des pierres utilisées.

Les auteurs proposent aussi des fiches couvrant le « *monitoring* », qui consiste en une évaluation générale des conditions du site rendant compte des changements de conditions, des types de détérioration et des zones touchées, de l'importance des détériorations et des types d'actions à engager pour les stabiliser. Une fiche détaillée met en rapport 17 types différents de détérioration identifiés, avec les principales situations dans la construction (fondations, base du mur, haut du mur, toiture, planchers, etc.). Enfin, une dernière fiche permet de rendre compte des activités d'entretien réalisées, de façon descriptive, pouvant être accompagnée de photographies.

Dans leur « Guide d'entretien » des Palais royaux d'Abomey, **Th. Joffroy et S. Moriset** (1996, *ibid*) développent la question de l'organisation, des tâches, de la fréquence et de la planification des travaux, des coûts. L'ensemble des interventions de préservation et d'entretien nécessite une organisation et l'affectation de moyens matériels, financiers et humains. Il faut donc préciser quels sont les différents intervenants et leurs statuts : architecte, conservateur,

équipe permanente du musée, équipe de journaliers engagés à la tâche, artisans spécialisés, entreprises en cas de plus gros travaux. Il faut préciser les rôles et les types de tâches des différents intervenants de l'équipe permanente. Puis préciser la fréquence des tâches et la planification des travaux.

Dans ce cadre, Th. Joffroy et S. Moriset, fournissent un ensemble de tableaux indicateurs qui permettent de corréler plusieurs paramètres :

- le type d'activité, la fréquence d'intervention, la quantité totale pour chacune des interventions et par an, la quantité de travail par ouvrier spécialisé ou non spécialisé, le quantitatif de matériaux nécessaires ;
- la fréquence des tâches selon un chronogramme annuel (sur 12 mois), avec le rythme des visites trimestrielles et des inspections régulières, les types d'actions régulières ;
- une planification des travaux eu égard à la mise en situation de risque de dégradation minimale, pour le nettoyage, le drainage, les murs et les toitures ;
- des plans pour les travaux de nettoyage (zones à nettoyer, sarclage, souches à arracher, etc.) ;
- des plans permettant de localiser les types de travaux de drainage (pentes à modifier, nouvelles pentes à créer, chéneaux d'évacuation et trous d'évacuation à créer) ;
- des plans rendant compte des travaux sur les couvertures (à reconstruire, à réparer, à traiter) ;
- des plans sur les travaux à effectuer sur les façades (murs à réparer ou à partiellement reconstruire, enduits à restaurer, parties de murs à badigeonner, etc.) ;

Et enfin la précision nécessaire à apporter aux coûts des travaux et tâches de mise en situation de risque de dégradation minimale, et d'entretien. Cette estimation peut être évaluée globalement, pour le court terme, dans un premier temps, et pour la charge des visites de diagnostic, les renforts de main d'œuvre, les matériaux, le transport. Une estimation plus précise doit être faite pour les mobilisations de main d'œuvre, en équivalent de jours de travail/an, pour les différents types d'activité, et pour les matériaux en fonction des quantités.

III.5. - Intervention minimale, réparations de base

Quelques auteurs évoquent des pratiques antiques ou traditionnelles qui décrivent en fait des interventions visant à réaliser un entretien périodique ou à entreprendre des réparations de base. D'autres auteurs évoquent des programmes de conservation réalisés au cours de ces dernières années qui se sont donnés pour objet immédiat d'entreprendre de telles actions d'intervention minimales, ou de « mise en situation de risque minimum », associées à des réparations de base visant essentiellement à rétablir un équilibre statique des structures et de leur relation à l'environnement climatique. Le propos reste ici assez généraliste et introductif, avant de développer plus en détail les sujets dans des chapitres plus spécifiques.

A propos de la réparation des vestiges de murs du site de Mari, Syrie, détériorés en leurs bases par un « sillon destructeur » et affectés par l'humidité (nappe phréatique), **J. C. Margueron** (1993), évoque le fait que les occupants du site semblaient réaliser un grattage et un nettoyage préalable des murs, de façon à ne conserver que la partie saine, suivi d'un bourrage avec des matériaux plus « denses » que la brique crue (briques cuites, pierres), bâtis au mortier de terre. L'archéologue précise que le niveau du sol ancien a pu être

ensuite surélevé enfouissant ainsi la réparation effectuée qui est alors placée comme en fondation.

Concernant la restauration de parties de murs en adobe d'une chapelle située à Uquia, Argentine, affectés par la pluie, le vent et le manque d'entretien, **Arnaldo Juan Pujal** (1993) évoque le principe d'une consolidation structurale des fondations en maçonnerie de pierre cyclopéenne et d'une réintégration de la maçonnerie en adobe. Il précise aussi qu'un des angles du bâtiment a été renforcé par des clés en bois posées tous les 1,50 m.

Dans son ouvrage « *Conservation of clay and chalk buildings* », **Gordon T. Pearson** (1992), décrit des techniques de reprise de parties érodées de murs en bauge, soit dans la partie courante des couches de bauge, soit à la liaison entre deux couches. Il s'agit d'abord de bien nettoyer les parties érodées et de bien régler la forme de la cavité qui sera reprise par creusement d'une saignée bien propre. Puis on effectue des forages qui permettront d'introduire à des niveaux réguliers des baguettes de bois de noisetier qui serviront d'ancrage au mortier de bauge utilisé pour reboucher ces cavités, ou d'accrochage pour les reprises d'enduits localisées. Pearson précise aussi que l'on peut, de façon optionnelle, interposer une armature de plastique (résille) entre la première couche et la couche de finition pour les reprises d'enduit.

Th. Joffroy et S. Moriset (1996, op. cit.), ont développé le propos de l'intervention « d'urgence » - qui peut être ici rapproché du concept d'intervention « minimale », et de la mise en situation de risque minimum.

- Interventions d'urgence

Ce sont des interventions visant à stopper au plus tôt les processus de dégradation pouvant engendrer, à court terme, des dommages plus importants et dont les réparations pourraient être plus coûteuses. Trois types de dégradation affectant les Palais Royaux d'Abomey nécessitent des interventions d'urgence.

- les processus de dégradation lents comme les fuites de toitures « dispersées » ;
- les processus de dégradation rapides tels que fuites de toitures « concentrées », avec écoulement important sur les murs ;
- les dégradations en cours pouvant entraîner en chaîne d'autres dommages plus importants telles que dégâts sur les bois des charpentes.

Ces interventions peuvent inclure des réparations provisoires (bouchages des fuites), des bâchages, un drainage intérieur des eaux de pluies pour éviter leur stagnation, un étalement des charpentes ou des murs, la pose éventuelle d'un tirant provisoire, le recyclage et le rangement des matériaux de structure démontés ou évacués.

- Mise en situation de risque minimum

Dès lors que les risques majeurs sont éliminés, il convient de s'attaquer aux processus de dégradation courants pour en éradiquer leurs causes. Ce travail doit être principalement orienté selon deux directions :

- la suppression des circonstances environnementales défavorables ;
- le blocage du processus de dégradations en chaîne (effet « domino »).

Les interventions peuvent alors concerner quatre niveaux :

- réduire les possibilités d'action du ou des facteurs de dégradation ;
- modifier l'environnement proche du bâtiment ;
- travailler sur les abords immédiats du bâtiment ;
- renforcer la structure ou des parties pour qu'elles résistent mieux aux agressions diverses.

Ce sont alors des travaux de « gros nettoyage » (propreté par déblayage des matériaux accumulés à la base des murs, des végétaux, traitements contre les termites, autres insectes et petits rongeurs. Ce sont des travaux de drainage périphérique des structures, en rétablissant une topographie adéquate pour modifier les pentes d'écoulement du terrain, et en réalisant des petits chenaux permettant d'évacuer l'eau au-delà des bâtiments. C'est, d'une manière générale une meilleure gestion des écoulements. Ce peut être aussi un abattage des arbres dont les racines peuvent soulever les fondations, ou dont les branches peuvent altérer les murs, avec un arrachage des souches. C'est encore la réalisation d'autres plantations qui pourraient constituer des parevents, face aux vents dominants. Ce peut-être la reprise de soubassements dégradés avec une intervention sur les abords immédiats (forme de pente de drainage). Ce peut-être aussi une reprise de parties de murs qui risquent de s'effondrer. Ou bien un traitement des fissures, la reconstruction nécessaire d'éléments porteurs des structures tels que piliers. Ou aussi la réfection des toitures en tôles, rouillées, dégradées, après avoir, si nécessaire, redressé la charpente. Il peut être encore nécessaire de prévoir une couverture des murs d'enceintes (couvertine ou petit chapeau).

Ces mêmes auteurs, évoquant un projet de conservation des mosquées de Tombouctou, Mali (1996), rendent compte de procédés de réparation de la base des murs en terre, de réfection de gargouilles des toitures plates et d'amélioration du drainage périphérique.

1 - Réparation de la base des murs

Les bases des murs des mosquées sont très érodés du fait d'eaux de ruissellement et d'eaux stagnantes mal évacuées. Le phénomène est aggravé lorsque le sable apporté par des tempêtes s'accumule à la base des murs et retient cette humidité. Mais, s'il convient de réparer ces murs très affaiblis par leur détérioration, encore faut-il être vigilant à la saison des pluies et de réaliser un désensablement lorsque c'est nécessaire. Le procédé de réparation a donc effectivement consisté en un désensablement et nettoyage de la base du mur, en un démontage des parties abîmées, et en leur reconstruction avec des morceaux de terre et des vieilles pierres d'Alhore (matériaux locaux), bâtis au mortier de terre.

2 - Reprise des drainages superficiels

Il s'agit essentiellement d'optimiser l'évacuation des eaux de ruissellement et de stagnation au-delà des murs des mosquées. Pour cela, l'opération a consisté simplement en un dégagement du sable de surface, suivi d'une étude des pentes du terrain à l'aide de règles, niveaux et ficelles. Les formes de pente ont été ensuite modifiées par ajout ou enlèvement de terre puis humidifiées et compactées. Enfin, une couche superficielle de sable a été rajoutée. Il est bien sûr conseillé à la population locale, de ne pas marcher sur ce système d'évacuation des eaux de surface.

3 - Reprises des gargouilles de toiture

L'optimisation d'une réparation de la base des murs et d'un système de drainage de surface des eaux manquerait de pertinence et d'efficacité si l'on ne traitait pas le problème de l'évacuation des eaux de pluie de la toiture qui vont tomber aux pieds des murs. De plus ces gargouilles étaient considérablement altérées, pourries par des problèmes d'infiltration qui mettaient également en danger la stabilité de la toiture. Ainsi, les gargouilles ont été démontées et remplacées par de nouveaux éléments, en interposant entre les gargouilles et leurs supports des feuilles de plastique. Puis la maçonnerie en terre des acrotères et de la toiture plate a été restaurée.

À l'occasion de la Conférence Adobe'90 (Las Cruces, USA), **Th. J. Caperton**, présente un bilan des campagnes de stabilisation qui ont été réalisées sur le site de Fort Selden (Nouveau Mexique), en 1972, 1974 et 1985. Il évoque les différents types d'interventions minimales et de réparations de base qui ont été réalisées.

- Couvertine des murs :

Durant l'époque d'occupation du Fort, les murs d'adobe étaient protégés par une couvertine de mortier de chaux. Sur d'autres forts, dans le courant du XIX^{ème} siècle, les murs étaient protégés par des planches en bois maintenues en place par des briques d'adobe. Durant la campagne de conservation entreprise en 1972, des essais de protection ont été réalisés avec des briques d'adobe stabilisées avec une résine polyuréthane (Pencapsula). Mais ces briques imperméables ont contribué à accélérer le processus de dégradation des murs en dessous de cette protection et sans doute plus vite que ne l'auraient fait les éléments naturels. Ces briques ont été démontées en 1974 et remplacées par une couche de mortier de terre non stabilisée, d'environ 2,54 cm d'épaisseur (1 in.). Ce procédé de protection a été répété en 1985 mais n'a résisté qu'une année à l'action des pluies et de la neige. Certains des murs non protégés se sont érodés par le haut, en forme ronde ou pointue caractéristique. Néanmoins, ce procédé de protection au mortier de terre qui donne de bons résultats esthétiques, devrait selon Th. J. Caperton faire l'objet de recherches visant à améliorer sa résistance à l'érosion.

Base des murs :

Beaucoup des murs présentaient une érosion typique résultant de problèmes de capillarité et de dépôts de sels, d'érosion éolienne ou même dans une moindre mesure à cause des rongeurs. En 1974, les bases de ces murs ont été consolidées en insérant de nouvelles adobes, après avoir préparé les murs en effectuant une découpe rectiligne. Les arêtes vives de ces nouveaux blocs ont été adoucies pour traduire les contours des matériaux historiques.

Pentes de drainage :

À proximité des murs, des reliefs en pente ont été réalisés de façon à évacuer l'eau au-delà du mur. Un nivellement similaire du terrain a été réalisé en parement intérieur et extérieur des murs de façon à éviter un risque d'accumulation d'humidité et à faciliter son transfert entre les deux parements. Quand l'érosion des murs en leur base était trop importante, des bermes en terre avec une forme de pente (évacuation de l'eau) ont été réalisées, de façon à consolider les murs et à garantir leur stabilité. Des drainages de l'eau ont été mis en place au passage des portes où dans les vides existant entre les vestiges. Quand cela n'était pas possible, l'eau était canalisée vers le centre des anciennes pièces (cuvette) ou elle pourrait s'évaporer.

Préservation paysagère :

Des plantations de végétaux locaux ne nécessitant pas d'eau pour pousser ont été réalisées au voisinage des vestiges, pour créer des barrières de vent et agir contre les tempêtes de sable. Aucune plantation n'a été faite à l'intérieur des ruines car cela risquerait de maintenir de l'humidité.

Cheminements de visite :

Des cheminements précis ont été définis pour les visiteurs, autour et à l'intérieur des ruines et ils sont conviés de les respecter.

A l'occasion de Adobe'90, l'architecte-conservatrice péruvienne **Ana Maria Hoyle** (1990), fait état des différents procédés de conservation qui ont été utilisés sur le site de Chan Chan (Trujillo, Pérou). Elle évoque les interventions suivantes :

Stabilisation structurale :

L'objectif de ces interventions visait essentiellement à stabiliser les structures du Palais Von Tschudi très exposées aux intempéries. Il s'agissait de créer des barrières pouvant s'opposer au vent et aussi de fermer les accès qui n'étaient pas originaux (brèches dans les murs), de façon à réduire cette érosion éolienne. Mais aussi pour mieux canaliser le transit touristique.

L'intervention a consisté en un nettoyage des débris et en l'élimination des matériaux salins. En plus du rebouchage des brèches dans les murs, les bases des murs ont été renforcés. Leurs parements furent reconstruits jusqu'à hauteur de l'évidence archéologique, et leurs sommets furent protégés par une couvertine ou « *capping* » (angl.). Les matériaux utilisés ont été des adobes de forme et de composition similaire aux originales et la technique de maçonnerie, au mortier de terre, a suivi le modèle archéologique. Les parties reconstituées ont été enduites d'un stuc composé à base de terre et de sable grossier (1 : 2) rajoutés de petits éclats de pierres, à raison d'une partie équivalente à la terre et d'un stabilisant naturel dosé à 5% par litre, du « *mucilago de tuna* » (*Opuntia ficus indica*), traditionnellement utilisé dans les constructions en terre et dans la restauration de Chan Chan dans les années 60. De même, les pans de murs présentant un faux aplomb ont été de nouveau positionnés à l'aide de maintiens et de clés en bois de caroubier, ou encore avec des adobes. Pour améliorer la prévention contre l'action éolienne d'autres murs ont été élevés aux orientations est et ouest, jusqu'à hauteur de l'évidence archéologique. Cela a permis de protéger un important secteur décoré du Palais Von Tschudi.

Couvertine des murs :

Les sommets des murs ont été reconstitués dans une forme plus homogène afin de mieux distribuer l'érosion des pluies, et pour mieux équilibrer l'absorption dans la masse totale des matériaux du mur. Les sels ont été éliminés avec du papier absorbant humidifié à l'eau distillée et à l'alcool dosé à 5 %. Puis une couche de protection a été réalisée avec un mortier de terre et sable (1:2) et éclats de pierres (1 partie), stabilisé au « *mucilago de tuna* » dosé à 5 % par litre. Une couche de finition à base d'argile en barbotine a été appliquée pour réduire la porosité du matériau contenant des éclats de pierre et pour harmoniser la couleur superficielle sur l'ensemble des structures. Tous les procédés employés sont considérés comme réversibles.

Consolidation des enduits et des reliefs :

Les enduits et reliefs originaux ont été débarrassés de leurs matériaux pulvérulents et les sels ont été nettoyés utilisant la même technique que précédemment décrite. L'adhérence de ces enduits et reliefs a été réalisée avec des injections de « *mucilago* », dosé à 5 - 10 %, mais aussi par injection de mortier stabilisé au *mucilago* et assez liquide. Les vides et les cavités ont été comblés avec du mortier, après une humidification préalable des zones traitées au *mucilago*. Une première couche a été réalisée en terre et sable grossier, de façon à donner une texture irrégulière facilitant l'adhérence de la deuxième couche finale avec des matériaux de texture plus fine.

Protection des structures par banquettes :

Pour mieux contrôler les facteurs du milieu ambiant et aussi l'impact du tourisme, les parements des murs, les banquettes et les rampes ont été

protégés par des petits murets construits en adobe et distants de 0,20 m. des structures originales. La topographie intérieure des sols a été modifiée de façon à favoriser l'écoulement des eaux vers le centre des espaces, loin des murs, intervention venant compléter la mise en place d'un système de drainage.

III.6. - Les abris et toitures de protection

La question de la protection des vestiges archéologiques, en terre ou même en autres matériaux, a été développée par quelques auteurs. Mais, on aura remarqué que les propos révisés sont très rarement critiques, ou trop succinctement, s'attachant plutôt à rendre compte d'une typologie des systèmes de protection et à débattre du point de vue de l'esthétique architecturale. Il s'agit là d'un aspect important de la question. Car un abri temporaire qui devient « durable », faute de moyens pour pouvoir le remplacer, ou un abri conçu dès le départ pour être durable, mais qui est d'une esthétique contestable dans son rapport à l'environnement physique (impact paysager), comme culturel, sont sans aucun doute, tous deux, peu acceptables. Mais, au-delà de la volonté de « bien faire » des conservateurs qui proposent ces solutions d'abris ou de toiture de protection, le temps et l'environnement agissent et génèrent parfois des effets secondaires dramatiques en maintenant une condensation de surface sur les matériaux, selon les saisons, en maintenant un taux d'humidité relative trop élevé, en créant un « effet de serre », ou en asséchant les matériaux protégés de la pluies mais non de la chaleur des saisons torrides, qui perdent alors leur cohésion et s'effritent, se pulvérisent. Autant de facteurs qui contribuent aussi à activer le développement de la vie biologique et de la détérioration par l'action de la flore et de la faune qui prolifèrent dans une ambiance favorable. Trop rares sont les auteurs qui abordent la question des abris sous cet angle. Quelques autres questions peuvent être soulevées : doit-on, même pour assurer la conservation des architectures de terre très exposées à l'eau et à l'humidité se prémunir totalement des effets de l'eau ? C'est à dire réfléchir et agir « contre » l'eau. Ou bien, doit-on dans une certaine mesure réfléchir et agir « avec » l'eau ? Et que dire de l'action cumulée de l'air (vent, turbulences) et de l'eau ? Toutes les voies, dans ces approches, n'ont pas encore été vraiment explorées.

III.6.1. - Du provisoire au permanent

Dans sa thèse présentée à l'Université Columbia, que nous avons déjà référencée, **Pamela Stacy Jones** (1991), évoque les techniques de protection des sites par construction d'abris. Elle considère que c'est l'une des meilleures techniques après celles de ré-enterrément ou « *reburial* », « *backfilling* » (angl.). Selon l'auteur, une couverture bien conçue est sans doute plus efficace qu'une simple couvertine ou « *capping* » (angl.). Mais il faut veiller à ne pas contribuer à des formes de dégradation ultérieure des vestiges en terre crue, en créant sous ces abris un « microclimat ». Le concept doit donc garantir une adaptation à l'environnement. Ces abris de protection peuvent être indépendants des structures protégées (comme c'est le cas du site de Casa Grande, en Arizona), mais il faut veiller à ce que le toit ne soit pas trop haut au risque de générer des turbulences par les effets du vent.

Selon Pamela Stacy Jerome, des abris provisoires peuvent être absolument nécessaires pour les sites en terre exposés, particulièrement lorsque les campagnes de fouilles sont en cours. Le drainage de ces toitures doit être bien pensé de façon à évacuer les eaux de pluie au-delà des vestiges protégés. Ces

abris agissent bien contre la pluie directe mais peuvent être dangereux en présence d'aérosols qui génèrent de la condensation. Selon G. Chiari (1983), cité par P.S. Jerome, « les fermetures totales avec des matériaux translucides (verre ou plastique), doivent être absolument évitées, car elles contribuent à générer un microclimat totalement différent et à créer un effet de serre ». L'aspect esthétique de l'abri est aussi un facteur important.

P.S. Jerome évoque le fait que l'emploi de couvertures de protection a été très développé pour la protection des sites minoens de Crète, à Monastiraki, à Mallia, à Cnossos, à Akrotiri, en utilisant des systèmes variés : toiture en métal et tôles (Monastiraki), structure en bois lamellé collé avec plaques de polycarbonate, (Mallia), dalles en béton (Cnossos), large structure en système *Dexion* et feuilles de plastique et Fibrociment (Akrotiri), qui, sans aucun doute ont fait beaucoup pour protéger ces sites.

Citant **P.W. Brown et J.R. Clifton** (1978), P.S. Jerome rappelle que « la préservation peut être plus difficile que la restauration, spécialement lorsque les structures n'ont pas de toit ». Les sites en terre, une fois fouillés, sont très fragiles et leur stabilisation induit généralement l'appel à des propositions techniques beaucoup plus complexes que la conservation d'artefacts dans une ambiance de musée. Selon **B.M. Feilden**, (1982), également cité par l'auteur, les conditions de l'environnement demeurent toujours incontrôlables. Les processus climatiques ne peuvent pas être stoppés, seulement modérés, et sans entretien de routine, les forces de la nature prévalent sur les stratégies de préservation même planifiées avec précaution.

Présentant un bilan de la conservation du site de Tell Qasile, Israël, **Amihai Mazar** (1999), évoque la réalisation d'une toiture sur une partie du site, érigée au cours des années 60 et 70.

Les parties supérieures des temples Philistins, qui étaient fouillés en 1972, étaient très exposées aux pluies hivernales qui causeraient inévitablement de graves dommages aux vestiges en briques de terre. Une action immédiate a donc été engagée, dès la fin de la campagne de fouilles, visant à construire une toiture de protection recouvrant une aire de 500 m². La structure a été réalisée en acier avec une couverture en plaques de Fibrociment. Ce principe s'est avéré être le plus rapide à mettre en œuvre et le moins coûteux. Il a en outre permis de continuer les campagnes de fouilles en 1973 et 1974, sous cette aire abritée. A. Mazar relève que la construction d'un abri est une solution qui est souvent critiquée pour son mauvais impact paysager mais qu'elle permet effectivement de préserver « parfaitement » les excavations. Il note aussi que « 23 ans après la fin des excavations, la zone fouillée sous la toiture est bien préservée et que son état est presque comme il l'était à la fin de la campagne de fouilles en 1974 ». *Effectivement, cette toiture provisoire est restée telle quelle et son esthétique contestable mériterait d'être révisée. Israël a largement développé ce principe de protection par la construction d'abris. On n'a pu l'observer lors d'une mission d'identification générale des sites en terre (mars 1998), à Tell Dan, Ashkelon, Rishon le Zion ou même à Caesarea.*

A l'occasion de la Conférence sur les « Mesures préventives en cours de fouilles et protection du site » (ICCRROM, Rome, Novembre 1985), deux communications sur la question des abris et couvertures de protection temporaires ont retenu notre attention.

Tout d'abord, **Ph. Barker** qui développe la question de la « création d'un micro-environnement » pour protéger les excavations archéologiques, de façon à mieux contrôler les incertitudes du climat (pluies torrentielles ou très fortes chaleurs) pouvant non seulement contrarier le déroulement des travaux, mais aussi altérer les vestiges mis au jour. Pour l'auteur, le problème est de « minimiser les effets obstruants et destructifs » du climat tout en conservant les avantages de la variation d'humidité, de sécheresse et de lumière qui sont utiles pour révéler des nuances dans les sols fouillés. Il faut également se préoccuper de la bonne santé des opérateurs qui travaillent sur le site et qui peuvent souffrir des affres du climat. Le contrôle des environnements extérieurs exige des abris de protection qui soient adaptables à la taille des zones fouillées, étanches à la pluie, suffisamment solides et stables pour résister aux vents, et, pour de grands sites, transportables. Ph. Barker propose alors d'utiliser des structures tubulaires recouvertes de feuilles de polyéthylène translucides, sortes de structures du type serres horticoles. Mais ces systèmes présentent des avantages comme des désavantages. Travailler sous une ambiance fermée et peut-être un peu confinée n'est pas acceptable par tous (claustrophobie) lorsque le vent souffle et que la pluie frappe le plastique. Par contre, par beau temps, il est possible de dégarnir partiellement la couverture en plastique et de retrouver l'ambiance naturelle, tout en étant protégé, soit du côté des vents dominants, soit du côté du rayonnement solaire. L'ambiance de travail sous abri permet aussi de mieux contrôler l'utilisation de produits utilisés pendant les fouilles (spray d'humidification par exemple).

Remarquons que de telles solutions, proposées à cette époque, même si elles peuvent présenter un intérêt comme solutions de protection « temporaire » ont finalement été rarement appliquées par la suite. Car du temporaire ou « provisoire », pour assurer une protection durant les campagnes de fouilles, au « permanent » à court et moyen terme, le pas peut être rapidement franchi, compte tenu du peu de moyens en équipement dont disposent la plupart des missions archéologiques. Alors, ce type de solutions de structure du type serres horticoles, comme d'ailleurs la protection des fouilles par des rouleaux de polyéthylène opaque, entre les campagnes successives, qui sont arrachés par les vents ou qui retiennent l'eau en cuvette s'infiltrant par des déchirures, devient davantage générateurs de graves problèmes.

III.6.2. - La typologie des solutions de protection et d'abri

Lors de cette même conférence de novembre 1985, **André Stevens** proposait « un bref bilan des systèmes apparents de protection - architecture ou construction - adoptés jusqu'à présent dans les pays du tiers monde », à l'aide d'exemples pris au Moyen-Orient, en Chine, en Afrique ou en Amérique. Stevens mettait l'accent sur la difficile cohabitation de structures nouvelles avec les vestiges archéologiques, notamment ceux en briques crues. Pour l'auteur, « protection et embellissement ne sont pas contradictoires mais complémentaires » (...) et, « dans certains cas, il est admissible de « prolonger » les vestiges du passé par une architecture contemporaine de qualité qui concilie protection et respect des lieux ».

Stevens passe en revue la typologie des systèmes de protection connus à l'époque. Nous reprenons ici ses dénominations en associant au propos de Stevens, d'autres sources et commentaires.

Robe / Terre / Ciment / Plexiglas :

L'auteur évoque le principe de la réalisation d'une « robe » de protection au mortier de terre peint à la chaux (ou stabilisé) qui a été mise en œuvre sur le site de Aruda le long de l'Euphrate, en Syrie. L'objectif était d'enrober les vestiges avec une « nouvelle gangue terreuse » abritant de la pluie les structures d'origine, « tout en conservant l'aspect général des ruines conservées ». Il évoque également des expériences similaires réalisées sur le site de Tepe Nush-i Jan, en Iran, avec un enrobage de « *kâghel* » (mortier traditionnel de terre et de paille). Nous connaissons l'adoption d'un principe similaire sur la ziggourat de Tchoga Zanbil, au sud de Suse, en Iran. Amihai Mazar, déjà cité (1999), évoque aussi ce principe de conservation des vestiges en terre du site de Tell Qasile, en Israël, pour préserver un quartier d'habitation de l'Âge du Fer I, fouillé en 1949-51 et en 1956, par lui-même. Cet enrobage réalisé à base d'un mortier de chaux et de sable local (1:5), ajouté d'un agent de prise (B.G. Bond) a recouvert les faces et le dessus des murs ruinés, jusqu'à hauteur de 60 - 70 cm. Le ciment a été totalement proscrit. A. Mazar relève que cet enduit a pu être sujet à dégradation et fissuration au fil des années mais qu'il est entretenu en utilisant la même composition de mortier que celle initialement utilisée. L'archéologue reconnaît que, bien que cette solution ait contribué à cacher les matériaux de construction originaux, ce fut sans doute le moyen le plus efficace pour préserver la jouissance publique des vestiges. G. Chiari, (1990) évoque aussi ce principe de réalisation d'une protection « sacrificielle » en revêtement de briques de terre-sable stabilisées au ciment (4-8 %), qui a été mis en œuvre en 1969 sur le site Irakien de Tell 'Umar. Il confirme l'efficacité du procédé bien qu'il contribue à dissimuler les matériaux originaux, sans être, pour sa part, comparable à une « reconstruction massive ». Pour sa part, André Stevens note que ce principe d'enrobage peut être acceptable s'il est associé à un bon système de drainage. Par ailleurs, ces systèmes de protection doivent demeurer provisoires et réversibles, en attente de travaux complémentaires de stabilisation structurale ou éventuellement de consolidation des matériaux. Stevens note en outre que ces procédés s'avèrent très coûteux par la masse de matériau de protection requise, selon la dimension des vestiges à protéger. Nous relevons avec insistance la question de l'entretien annuel de ce type de protection par enduits d'enrobage ou revêtement sacrificiel, généralement avant (prévention) et après (réparation) les saisons des pluies qui sont souvent très dévastatrices. Le cas précédemment cité du site de Tchoga Zanbil, le montre très clairement (réfection annuelle de la protection au mortier de « *khâgel* »).

Dans ce même chapitre typologique de protection, Stevens note l'inefficacité des mortiers de protection au ciment trop dosés qui fissurent et annulent leur effet protecteur, sans compter le fait qu'ils donnent au site « l'aspect d'un chantier de construction nouvelle ».

A. Stevens évoque également l'utilisation de plaques de Plexiglas qui ont été utilisées pour la protection des parements en briques crues de la fortification de Gela, en Sicile. Le système est totalement incongru car il crée une barrière étanche au-delà de la surface des murs et favorise un maintien d'humidité (condensation), sans compter sur les difficultés de mise en œuvre de ces plaques de Plexiglas et les problèmes de joints pour supprimer les risques d'infiltration. Un système sans aucun doute à proscrire.

Toit/Module/Architecture :

Stevens relève « qu'en matière (...) de construction de toits protecteurs, les bons exemples sont très rares, du moins ceux qui se distinguent par une architecture de qualité appropriée au site, ou ceux qui représentent quelque audace dans l'utilisation des matériaux et techniques contemporaines ». Il

rappelle alors les recommandations issues du symposium international d'Ankara (1980), qui suggéraient l'étude de « systèmes modulaires » de protection, « à prix modéré » et « permettant une fermeture complète ou partielle ». La conception de tels abris devrait être développée par « des spécialistes de différentes disciplines (architecture, archéologie, conservation). Nous notons que ces recommandations d'Ankara ont été peu appliquées par la suite au bénéfice de solutions « parachutées » comme le soulignait Stevens, avec effectivement des réalisations qui peuvent être très souvent controversées quant à leur efficacité (sauf contre l'impact direct de la pluie verticale), et générant des microclimats « humides » à l'origine d'une activation des dégradations de surface par condensation, et d'un processus de biodégradation, ou encore générant une activation des érosions par ruissellement à la périphérie des zones couvertes. Mais aussi discutables quant à leur coût (souvent faramineux), et quant à leur intégration « paysagère », contribuant davantage à un enlaidissement qu'à un embellissement des sites protégés.

Toit/Métal/Éléments portants :

Stevens relève que « au vu de quelques exemples représentatifs des tendances de ces 20 dernières années, l'aspect esthétique est souvent relégué à l'arrière-plan des préoccupations immédiates ». Il relève l'exemple de la protection de quelques salles du palais d'Assurbanipal II à Kalkhu, en Irak, couvertes par une structure en « poutrelles métalliques et matériaux traditionnels ». Stevens commente d'autres exemples (palais de Sennachérib à Ninive, structure métallique à Tepe Nush-i Jan, Iran, site d'Akrotiri à Santorin, ...). *Nous pouvons rajouter ici l'exemple de la structure métallique et de coques autoportantes recouvrant l'Enceinte Sacrée du site de Mari, Syrie. Chacun des exemples cités permet de relever divers problèmes comme la difficulté à garantir la pénétration de lumière sous les toitures (lanterneaux, bandes zénithales), les montants métalliques fichés dans des murs en terre du site qui contribuent à détruire les vestiges, les problèmes de dilatation thermique différentielle entre la zone couverte et l'extérieur, qui activent la fissuration des murs, la question de l'érosion par les eaux de pluies mal drainées venant de ces toitures (Mari), etc.*

Toit/Béton/Matériaux lourds/Forme

« Béton armé et brique crue font souvent mauvais ménage » comme le relève A. Stevens. Nous préciserions volontiers font « toujours » mauvais ménage. Ce sont là en effet des solutions qui en appellent à l'ingénierie du béton et qui, pour donner le change d'une intégration associent l'utilisation de la brique le plus souvent en remplissage d'ossatures en béton (piliers, poutres, chaînages). *Elles sont très souvent inesthétiques au possible, coûteuses. A moins d'un traitement architectural d'exception, et donc a priori d'un coût totalement rédhibitoire, nous ne voyons pas vraiment l'intérêt de telles solutions.*

5 - Toit/Matériaux traditionnels/Provisoire :

Stevens relève plusieurs exemples de tels systèmes de protection provisoire (contre la pluie, le vent, le soleil), réalisés en matériaux locaux, bois, bambous, nattes de roseaux ou de joncs et terre, ou poteaux de bambous et toiles de protection, imperméables et provisoires. Les exemples variés donnés par l'auteur concernent le temple de Nabu-Sha-Hari, à Babylone, les solutions en nattes recouvertes de terre (torchis), développées à Chan Chan, pour protéger les frises en adobe du Palais Von Tschudi, et sur la Huaca de La Luna, Vallée du Moche (Trujillo, Pérou), des systèmes analogues qui furent utilisés pour protéger les bas-reliefs des palais royaux d'Abomey, au Bénin. Tant que ces solutions sont efficaces pour des raisons climatiques saisonnières, ou pour pallier des risques de catastrophe naturelle, tant que ces solutions ne sont pas

trop coûteuses (matériaux et main d'œuvre locale), tant qu'elles ne sont pas associées à « une mise en valeur de type social, à l'écart de toute ambition touristique », comme le relève A. Stevens, il n'y a pas lieu, effectivement, de contester leur utilité. *On doit pourtant noter ici que, pour répondre aux risques d'inondation provoqués par le phénomène du « Niño », le quartier des audiences du Palais Von Tschudi, à Chan Chan, ainsi que d'autres secteurs, ont dû être protégés par des structures provisoires en ossature de bambou et/ou caroubier supportant des toiles tendues. Lors d'une visite récente à Chan Chan (1999), plusieurs experts notaient que cette solution contribuait à générer d'autres pathologies tel que la perte de cohésion du matériau, par déshydratation, entraînant de graves effritements irréversibles.*

Matériaux nouveaux/Structure et Architecture :

Dans ce chapitre, A. Stevens développe son propos introductif sur la complémentarité de la protection environnementale et de l'embellissement architectural. « L'utilisation de matériaux nouveaux peut se justifier lorsqu'il s'agit de recouvrir de grandes étendues, ou tout simplement si leur choix provient d'une volonté délibérée (...) en voulant faire œuvre d'architecte contemporain ». Stevens relève l'exemple de la protection des vestiges de Casa Grande (Arizona, USA), qu'il décrit en ces termes : « une élégante structure métallique composée de quatre fines colonnes fichées légèrement de biais dans le sol et d'une couverture qui affecte la forme d'une pyramide très aplatie. La construction nouvelle est totalement indépendante des vestiges et sa présence toute aérienne fait songer à un bel objet délicatement posé sur le sol et prêt à s'envoler ». Il donne ensuite l'exemple de structures plus « présentes » (fortification de Gela, en Sicile, Mari en Syrie) et moins attractives quant à leur esthétique architecturale et qui posent aussi des problèmes d'efficacité : mauvais drainage des eaux de pluie, ruissellement, érosion, creusement. Il donne encore l'exemple du projet de restauration du couvent Santo Domingo, à Cusco, Pérou, partiellement détruit après un tremblement de terre qui a permis de définir un plan de mise en valeur des vestiges du temple Inca de Coricancha, sur lequel avait été bâti le couvent. Le temple a été inséré dans l'une des quatre ailes du couvent, sous un espace de toiture entièrement libre. Au-delà de la description du système structural adopté, A. Stevens note que ce projet est « une prouesse technique pour un résultat brillant où s'intègrent harmonieusement les colonnades espagnoles, les murs incas et les prolongements contemporains : fermes métalliques et parois de verre. Puis sont présentés des projets réalisés en Chine, l'un sur le célèbre site néolithique de Banpo, l'autre sur les fouilles du tombeau de l'empereur Qi Shi Huang, situé non loin de Xian, déclinant le principe de grandes halles. Sur ce deuxième site « où les archéologues chinois mirent au jour près de 6 000 statues en terre cuites de guerriers et chevaux attelés à des chars, en grandeur nature et disposés dans une fosse longue de 210 mètres et large de 60 » a été dressée « une gigantesque toiture en forme de berceau (...) composée de 17 arcs en treillis métallique (arc à 3 rotules), d'une portée de près de 70 mètres ». A. Stevens observe que « la solution retenue dans ce cas accentue encore l'importance du site par ses dimensions hors du commun. La hardiesse de la structure est ici à la mesure des découvertes exceptionnelles dont la plupart restent visibles dans l'état de leur mise au jour à partir de galeries qui surplombent le site. Outre son rôle de protection des vestiges, cette halle permet aux archéologues chinois de continuer leurs recherches à l'abri des intempéries ».

Dans ce registre d'application du concept « matériaux nouveaux/structure et Architecture », nous avons pu en effet observer plusieurs projets très intéressants assurant à la fois la protection de vestiges archéologiques et leur mise en valeur architecturale comme paysagère. Ces projets sont sans doute

d'une moindre échelle que ceux cités par A. Stevens, et plus récents, mais montrent combien le concept a été décliné depuis ce début des années 80, parfois avec succès. Rappelons l'exemple du petit musée de Sallèles-d'Aude, en France, dont l'une des façades est prolongée par une structure métallique couverte de toiles tendues protégeant les vestiges de fours à potiers gallo-romains et permettant une vue aérienne directe de l'ensemble grâce à une passerelle. Ce projet, conçu par l'architecte français Roland Castro, à la mesure de moyens encore assez modestes, est à notre sens un bon compromis fonctionnel et esthétique. Notons également un projet réalisé en Israël, sur le site byzantin de Ein Gedi où l'architecte Alex Blum (†) a réalisé une superbe couverture de protection en structure tendue protégeant de magnifiques mosaïques. Dans le paysage désertique environnant, cette structure réinterprète les concepts de l'architecture nomade et prend, en bordure d'une palmeraie et sur un terrain caillouteux, un relief paysager tout à fait attrayant. Il y aurait sans doute beaucoup d'autres exemples à présenter ici.

Structures nouvelles/Grandes portées/Coupoles/Nappes/etc. :

A. Stevens évoque ensuite quelques structures contemporaines de grande portée, comme les hangars d'aéroport, les constructions industrielles, agricoles et sportives, les halles d'exposition, « qui pourraient utilement inspirer les responsables de la protection des sites archéologiques ».

Il évoque des projets de grandes coupoles ou dômes géodésiques qui ont été imaginés mais qui sont restés lettre morte : coupole devant couvrir le Temple de Nabu Sha Hari, à Babylone, Erektéion et partie de l'Acropole d'Athènes qui auraient été couverts par un cube en matière plastique et par un globe en Plexiglas (contestable), et d'autres exemples. Stevens évoque ensuite différents projets contemporains d'équipements sportifs ou d'aérogares, dont l'inévitable référence aux structures tendues de l'aéroport de Jeddah, en Arabie Saoudite, ou le pavillon de la RFA lors de l'exposition universelle de Montréal (1967). Ce sont bien sûr là des exemples qui ont fasciné la génération des jeunes architectes des années 70.

Mais ne faut-il pas tout de même définir une plus juste mesure pour de tels projets de protection et de mise en valeur par l'attrait architectural et paysager des structures conçues et réalisées ? La protection et la mise en valeur sont indispensables comme en conviennent la plupart des architectes, archéologues et conservateurs, qui travaillent sur de nombreux projets. La protection est sans aucun doute la priorité pour les sites et édifices bâtis en terre crue. Mais, de l'échelle des grands sites archéologiques à celle des édifices historiques, la question doit être différemment posée, et traitée. Par ailleurs, on sait trop par l'expérience de ces dernières années que la plupart des structures de protection qui ont été réalisées n'ont pas toujours permis d'atteindre les objectifs poursuivis. La protection d'une partie de certains vestiges dont l'intégrité archéologique est plus vaste que celle des seules parties protégées, se fait souvent au détriment des aires non protégées et parfois « sacrifiées ». Les dégâts causés aux sites, à la périphérie de ces structures, sont souvent irréversibles. La question de la génération d'un microclimat sous les structures créées, parfois insuffisamment ventilées et contribuant au maintien d'une ambiance humide, au développement d'une activité biologique (flore, faune), est aussi un vrai problème qu'il convient de rappeler encore. Enfin, la question du coût de ces réalisations qui, même modestes, engloutissent des sommes considérables. Ces sommes auraient souvent méritées d'être affectées, en priorité, au travail archéologique et aux travaux de documentation, de préservation, de stabilisation, de consolidation qui constituent, à l'évidence, les premières étapes nécessaires de conservation préparant une mise en valeur.

Le débat sur cette question est bien sûr toujours ouvert et contradictoire et, les archéologues, les conservateurs, les architectes, sont loins de pouvoir présenter une position claire et commune. Les institutions qui gèrent le développement des projets archéologiques et de conservation, tributaires des volontés politiques et des ressources financières, n'ont pas non plus la possibilité de proposer une position claire. Le propos de A. Stevens, près de 15 ans après, reste tout à fait actuel car, comme il le dit, « en matière d'abri protecteur des vestiges archéologiques, la plupart des réalisations (...) paraissent peu convaincantes aux yeux d'un architecte d'aujourd'hui ». Mais, même si « la notion d'abri protecteur évolue vers celle d'œuvre d'architecte », nous pouvons nous accorder avec A. Stevens en relevant que œuvre d'architecte n'est pas « nécessairement synonyme de gigantisme ou de mégalomanie ». Il ne peut aussi y avoir de « gadget moderniste », comme de « geste architectural gratuit », comme « d'audace qui manquerait de respect ». Toute solution est affaire de compromis dans chaque contexte distinct. Un compromis peut être « bon » et ne pas refléter un « consensus mou » et il faut certainement s'accorder sur la valeur d'une « audace respectueuse du site ». Le site, première ressource qu'il convient, en priorité de protéger, conserver et valoriser, mais en se souvenant, pour ce qui concerne l'architecture de terre, qu'elle n'a jamais été « définitive », qu'elle a toujours été « entretenue » et que, à ce titre, le principe d'une protection de caractère définitif, même si, selon A. Stevens, « il n'y a pas de conservation sans actualisation des lieux au travers d'un signe du XXI^{ème} siècle », doit être toujours discuté, pour chaque situation et selon le degré de valeur culturelle universelle.

III.7. - Les couvertines ou « capping »

Nous avons déjà introduit des exemples de ce principe de protection des sommets des murs en terre exposés aux agents climatiques, par réalisation d'une couvertine de matériaux rapportés ou de mortier. La littérature abonde en exemples de telles solutions qui ont été mises en œuvre depuis plusieurs décennies sur de nombreux sites du monde, avec des résultats plus ou moins heureux bien que l'efficacité du procédé soit reconnu par la majorité de la communauté des conservateurs architecturaux. Nous ne donnerons pas davantage d'exemples ici bien qu'il nous soit apparu nécessaire d'isoler les solutions associant le principe du « capping » (angl.) avec les recherches réalisées sur la consolidation à base de produits chimiques à laquelle on consacra un chapitre spécifique. Nous avons par contre prêté une attention particulière aux rares tentatives de synthèse sur cette question des couvertines qui sont déjà anciennes, alors que le développement des expérimentations continue et pourra offrir à l'avenir d'autres conclusions.

III.7.1. - Les propriétés du procédé de « capping », des exemples et des avis

• Rôle et propriétés des « cappings » :

Dans le cadre de sa participation au Cours sur la Conservation Architecturale de l'ICCROM, **Michel Romero Taylor** (1987) a fait le point sur la question de la protection des murs en adobe exposés, par « capping ». La synthèse proposée par l'auteur couvre à la fois le point de vue de l'efficacité et de l'esthétique de ces techniques de protection pour les sites archéologiques et les bâtiments historiques. Le propos est tout à fait remarquable et méritait d'être rappelé dans cette revue de la littérature.

D'entrée, M.R. Taylor relève que, malgré tous les efforts qui ont été entrepris pour résoudre ce problème de la protection des sommets de murs en terre exposés, les solutions n'ont pas encore apporté des résultats satisfaisants. Le problème du « *capping* » consiste à protéger des structures qui, à l'origine, étaient couvertes par des toitures. La recherche de M.R. Taylor, constitue une revue de la littérature qui a porté sur le fonds documentaire de l'ICCROM concernant ce sujet spécifique. Cela a permis de référencer les techniques variées de « *capping* » sur la base de références considérées comme représentatives de la question, bien que non exhaustives. L'un des problèmes relevés est celui de l'esthétique des murs en adobe recouverts d'un « *capping* » qui, selon **G. Chiari** (1987), cité par Taylor, « sont affreux ». D'autres observations conduites aux USA par Charlie Steen, montrent que l'emploi du ciment contribue davantage à accélérer le processus d'érosion. Mais Steen pense que la terre stabilisée au ciment peut présenter davantage d'efficacité bien que les propriétés visuelles soient contestables. Ainsi, les essais réalisés par Steen par la suite, dans les années 70, sur le principe d'une protection des sommets de murs avec des adobes imperméabilisés par des produits chimiques (résine polyuréthane « *Pencapsula* ») se sont avérés dramatiques du fait d'une dégradation notoire du matériau original à la liaison avec ces protections consolidées (cf. III.5, **Th. J. Caperton**, 1990, op. cit.).

En 1971, le problème de la protection par « *capping* » a été considéré comme de première importance et l'on a défini les propriétés indispensables du procédé qui :

- 1 - doit être assez résistant à l'eau ;
 - 2 - ne doit pas être trop rigide ou présenter une expansion thermique supérieure aux murs d'adobe ;
 - 3 - ne doit pas trop contraster avec les matériaux d'origine ;
 - 4 - ne doit pas être trop coûteux car de grandes quantités sont nécessaires.
- En outre, l'accent était mis sur l'obligation d'un entretien des procédés utilisés.

Des essais étaient alors entrepris pour développer l'emploi d'un mortier de terre stabilisée au ciment ou pour utiliser des briques de terre stabilisées au ciment, selon le type de murs à protéger. *Gullini* (1972) recommandait que ces briques de protection aient un débord minimum de 1 cm de part et d'autre du mur, pour éviter que l'eau ne pénètre à l'interface du mur original et de la couverture en blocs de terre stabilisée. On se reportera aussi à un propos de **G. Chiari**, déjà cité, évoquant ces expérimentations réalisées en Irak, en 1969, qui ont confirmé une bonne réponse dans le temps alors que d'autres expérimentation de « *capping* » en terre-sable-ciment (« Archives » de Séleucie) n'ont pas été vraiment satisfaisantes, bien que contribuant à ralentir le processus de dégradation, dans le temps.

Des solutions expérimentées en Iran, à base de terre mêlée de broussailles (Maliyan), ou de mortier de terre façonné en forme bombée (Suse), ou de mat végétal tressé recouvert de toile de jute immergée dans du bitume (Tepe-Nush-i Jan), semblaient donner des résultats satisfaisants mais étaient contestables sur le plan esthétique. On voyait aussi se développer, à cette époque du début des années 70, la problématique de la protection du sommet des murs par la pose d'une couche de briques consolidées chimiquement, ou même par imprégnation chimique directe (Conférence de Yazd, 1972). Mais des participants à cette même conférence relevaient l'efficacité des protections traditionnelles à base de « *kâhgel* » (mortier de terre et de paille). D'autres techniques traditionnelles utilisées au Pérou consistent à protéger le sommet des murs avec des adobes biseautées en forme de triangle en leurs extrémités,

qui sont recouvertes de paille puis de tuiles ou de pierres plates. Pour la protection des murs historiques, **Sutter** (1978), propose de démanteler les deux rangs supérieurs d'adobe détériorées et de les protéger par un petit toit fait de bois, bambou et paille. Cette technique a été appliquée par Jorge Marroquin sur le site Inca de Raqchi, situé au sud de Cusco. La petite toiture recouvre une rangée d'adobes bâties en forme concave c'est à dire présentant une pente. Le procédé de toiture, assez élaboré, a prouvé après dix ans de « monitoring » qu'il ne nécessitait pas trop d'entretien. Dans le cas évoqué, les murs des vestiges étant très élevés, l'impact visuel de cette toiture de protection est minimal. D'autres techniques de « capping » ont été également testées au Pérou, consistant en un mortier de terre et de paille stabilisé à 2 % de bitume et saupoudré de terre tamisée, pour garantir la même coloration que les murs. Sutter (1978) évoque aussi des mortiers de terre, paille, chaux, brique pilée (sorte de ciment romain), ou de terre stabilisée au ciment, ou encore de terre argileuse stabilisée à la chaux et à la paille. *D'autres techniques utilisées en Arabie Saoudite (Riyahd), ou au Sultanat de Oman (Bahla), consistent à réaliser des « cappings » à base de « juss » (plâtre) ou de « sarooj » (chaux) ou encore de terre stabilisée au « juss » ou au « sarooj ». On connaît aussi le principe traditionnel du « dess », au Maroc qui consiste à réaliser un chapeau de forme ronde, débordant de part et d'autre du mur, bâti sur un support de roseaux, en terre stabilisée à la chaux et parfois mêlée de paille. Les techniques de protection des sommets de murs par imprégnation de produits chimiques ont été testées sur les sites du sud-ouest des USA mais elles restent tributaires de problèmes de fissuration, de délamination et d'érosion qui doivent être régulièrement traités par bouchage à base de mortier de terre pour conserver aussi une apparence similaire entre les parties traitées et les matériaux originaux. Cela sera vu plus en détail par la suite.*

• Enduits et « cappings » en terre stabilisée

Dans le Bulletin US/ICOMOS n° 5 d'octobre 1997, un article évoque le plan de conservation du « Fort Union National Monument », région de Santa Fe, Nouveau Mexique. Au-delà d'un relevé des conditions, réalisé en 1995, l'équipe de travail du « National Park Service » a entrepris un programme d'expérimentations de solutions de protection de murs-tests par « capping », en 1996. Ces « cappings » testés ont été réalisés en adobes non stabilisées ou en adobes stabilisées à la chaux hydraulique naturelle, à la chaux hydraulique artificielle à l'émulsion acrylique ou au ciment Portland. Des enduits de protection en terre stabilisée et/ou non stabilisée, ont été appliqués sur des murets-tests et sur des parties de murs historiques. Au printemps de 1997, après une saison d'hiver, un contrôle de l'expérimentation fut réalisé de façon à définir une stratégie pour la préservation des ruines en adobe. En effet, à Fort Union, la reconstruction est interdite. Par ailleurs, la protection par abri n'est pas envisageable, à cause de la dimension du site et à cause d'un impact visuel négatif sur le fort et sur le paysage. La stratégie adoptée, dérivée de l'expérimentation a prôné l'usage de revêtements de protection en terre amendée et/ou non amendée. Il a été aussi décidé d'accepter certaines réintégrations structurales en adobe non stabilisée, pour garantir la stabilité de certains éléments architecturaux en état critique. Des solutions de consolidation par contrefort et d'étalement avec des tubes d'acier ont été également envisagées. Mais, le programme de préservation qui a débuté en 1997, avec une planification pluriannuelle, a privilégié la réalisation de nouveaux « cappings » en adobes stabilisées remplaçant ceux en mortier de terre stabilisée au ciment qui avaient été réalisées 30 années auparavant. Lorsque l'on craignait que la destruction de ces anciens mortiers puisse affecter le

matériau original, il était préférable de reboucher les fissures avec le nouveau mortier utilisé, puis de réaliser une autre couche sacrificielle de protection.

Il convient aussi, sur cette problématique du « *capping* », de distinguer les protections temporaires réalisées durant les fouilles - ou pour assurer une protection entre les campagnes de fouilles - des protections plus durables. Si les premières peuvent être réalisées avec des matériaux végétaux tressés (« mats »), ou par du mortier de terre naturelle recouvrant des matières végétales, solutions totalement réversibles, les deuxièmes exigent plutôt des solutions de mortier de terre stabilisée sur un rang d'adobes sacrificielles. Mais ces systèmes exigent aussi de l'entretien. **M.R. Taylor** évoque aussi des essais réalisés sous son contrôle sur le site de Fort Selden, en 1985-86, à partir de briques stabilisées à l'asphalte posées de manière à configurer une pente de drainage de surface des eaux de pluie, recouvertes d'une couche de mortier de ciment recevant un chapeau de briques cuites. Le système semble s'être avéré efficace mais peut être contesté sur le plan esthétique.

Dans le cadre de sa recherche, M.R. Taylor a consulté plusieurs experts qui lui ont donné leur avis sur divers procédés pouvant être retenus. Ainsi, Giorgio Torraca recommande l'emploi de mortier de terre stabilisée au ciment mais également amendé en paille. Giacomo Chiari recommande aussi le même procédé tout en relevant que ce n'est pas une solution parfaite. Il préconiserait plutôt l'emploi de briques de terre stabilisée en couverture plutôt que le mortier qui a tendance à se fissurer et donc à laisser des voies d'infiltration. Il conviendrait plutôt d'utiliser des mortiers de terre faiblement stabilisés au ciment. Alejandro Alva préconise que l'on étudie les savoir-faire locaux en matière de protection des sommets de murs plutôt que d'utiliser des techniques importées et des matériaux coûteux que les ouvriers locaux ne peuvent que difficilement utiliser. Hugo Houben suggère que l'on se préoccupe du rapport entre le débord des systèmes de protection et leur épaisseur car il semblerait que cela affecte le degré d'érosion du matériau protégé.

III.7.2. - Expérimentations innovantes

Chapeau absorbant :

Dans un travail de DEA présenté à l'Ecole Pratique des Hautes Etudes de Paris (section IV), **Mahmoud Bendakir** (1993), Doctorant du laboratoire CRATerre-EAG, rend compte de diverses expérimentations de conservation qui ont été entreprises sur le site de Mari, Syrie, sous la direction de l'archéologie J.C. Margueron, directeur de la mission de Mari. Au delà d'autres expérimentations qui seront évoquées par la suite à propos du traitement de l'humidité à la base des murs, M. Bendakir a développé des recherches et expérimentations sur un système de « chapeau absorbant ». Jouer « avec » l'eau, plutôt que « contre » l'eau.

Le procédé habituel pour préserver le haut des maçonneries en terre consiste en la réalisation d'un chapeau ou d'une couverture étanche comme on l'a précédemment vu. Or, lorsque les murs sont épais, ce procédé peut présenter des inconvénients car la grosse quantité d'eau s'écoulant par les bords du chapeau peut ruiner le mur en le ravinant sur ses faces verticales. Par ailleurs, les matériaux utilisés, souvent étanches, empêchent l'évaporation de l'humidité par le sommet. Reprenant un principe de protection temporaire traditionnel de la région du Dauphiné (France), qui consiste à protéger les murs de pisé en cours de construction par des bottes de paille, M. Bendakir et **F. Vitoux** ont imaginé le principe d'un « chapeau absorbant ». Une expérimentation a été réalisée sur un

des piliers de la « Salle aux piliers », en 1990. Il s'agit de réaliser une protection qui doit absorber toute l'eau lors d'une pluie et limiter au maximum le ruissellement le long des faces verticales du mur. Egalement ne pas faire obstacle aux remontées capillaires issues du cœur du mur et s'évaporant en partie par le sommet. Le chapeau absorbant doit aussi pouvoir résister à l'impact des gouttes de pluie et à leur érosion, il doit avoir une forme empêchant le ruissellement sur les côtés, permettre une évacuation rapide de l'eau accumulée et offrir une capillarité supérieure à celle du mur de façon à ne pas faire obstacle au séchage du mur par le sommet. Des essais d'absorption ont été réalisés au préalable sur des échantillons afin d'évaluer l'épaisseur à donner à ce chapeau absorbant. Puis, sur place, le procédé est mis en œuvre en trois étapes. D'abord, une préparation de la surface horizontale du sommet pour recevoir le chapeau. Puis, la mise en place d'un ruban de bordure de 10 cm de hauteur, qui est réalisé en terre stabilisée au ciment (12 %) et avec 1/2 volume de paille. Ce principe permet une bonne résistance au ravinement des pluies et évite les fissures de retrait. Enfin, on remplit l'intérieur de la bordure sur toute la surface horizontale du mur avec une terre peu stabilisée au ciment (6 %) qui constitue la masse absorbante. Pendant la cure de séchage, le mur est recouvert d'une feuille de plastique. Après plusieurs contrôles successifs, les dosages en ciment et en paille ont été modifiés et le procédé s'est avéré efficace.

III.7.3. - En guise de synthèse sur la question du « capping »

M. R. Taylor (1987, op. cit.) discute plusieurs aspects fondamentaux de la question liés à l'efficacité et à l'esthétique des solutions de « capping ».

• Les raisons pour ne pas enterrer ou pour abriter les sites par des abris

L'un des dilemmes est le changement d'apparence résultant de la protection des sites en terre. Les ré-enterrer est une solution simple et efficace. Mais il y a sûrement de meilleurs procédés à envisager, autres que les abris de protection (qui peuvent être temporaires) et dans ce cas le « capping » présente un intérêt certain. Cela dépend aussi du type de mise en valeur que l'on prévoit de développer (le site sera-t-il ou ne sera-t-il pas visité ?). De toute façon, il est chaque fois indispensable de bien étudier le degré d'érosion des surfaces horizontales et verticales, et d'étudier les facteurs climatiques. On peut être parfois en situation d'équilibre avec un processus d'érosion limité ou ralenti. Il est aussi important de considérer que l'on doit préserver les sites au maximum pour la jouissance publique.

• Le choix des matériaux de « capping »

L'emploi d'un mortier traditionnel de terre, ou de terre amendée en paille, est considéré comme une technique de conservation valide dans la mesure où un entretien est périodiquement assuré. Mais, si le « capping » peut être facilement entretenu, les murs peuvent aussi souffrir d'érosion. L'entretien doit être assuré quand c'est nécessaire. Beaucoup objectent que la réalisation d'un « capping » est souvent destructive pour le matériau d'origine (pose d'échafaudages et d'étais), ainsi que leur entretien périodique qui oblige à remettre en place ces échafaudages et étais. A la longue, cela peut causer d'importantes dégradations. Quant aux adjuvants et produits imperméabilisants, M.R. Taylor note qu'à l'époque où il développe son propos, on ne dispose que peu de littérature scientifique. Mais il relève que ces traitements risquent d'être

confrontés à des problèmes d'érosion différentielle entre le sommet des murs très exposés aux précipitations et leurs parois courantes. A cette époque, les essais réalisés à Fort Selden, sous sa conduite, se sont avérés être un échec, après 1 an et demi d'exposition. L'emploi du ciment Portland pose des problèmes de fissuration, de manque d'adhérence et d'imperméabilisation, qui donnent de mauvais résultats. L'emploi de briques stabilisées au ciment, ou à l'asphalte, bâties au mortier de ciment en forme de couvertine, pose les mêmes problèmes. La technique de pose des briques de protection en « boutisse » avec une légère pente et un débord, semble plus efficace. Mais il faut compléter le système avec un drainage de la base des murs. L'essentiel semble bien être d'évacuer les eaux de pluies et de ruissellement au delà des murs de terre, de façon à ce qu'il n'y ait pas de stagnation, d'infiltration. Ainsi un travail sur la forme et sur l'esthétique des « cappings » au mortier de terre est chaque fois nécessaire.

• ***Durabilité et possibilité d'entretien***

L'entretien tient une place essentielle, quel que soit le procédé de protection utilisé. Certes, un mortier de terre exige un entretien régulier et peut contribuer à détruire une partie du matériau original. Mais un enduit imperméable, qui fissure et qui retient l'humidité, pose des problèmes encore plus graves. Il est remarquable de constater que beaucoup de procédés traditionnels sont d'une réelle efficacité et qu'ils mériteraient d'être davantage étudiés.

• ***Disponibilité locale et coût des matériaux de « capping »***

Il convient d'effectuer des recherches sur les matériaux, les techniques et les savoir-faire, localement ou régionalement disponibles. Des recherches historiques s'imposent pour collecter une documentation pouvant rendre compte de ces pratiques anciennes. En effet, la plupart du temps, l'utilisation de matériaux et de techniques d'importation est d'un coût rédhibitoire.

• ***Différencier l'ancien du nouveau***

Même un mortier de terre naturel utilisé en protection sera différencié des matériaux originaux du mur. Le temps contribuera à l'intégration du nouveau avec l'ancien. Mais, d'une façon générale, il est préférable de différencier l'intervention du matériau original et d'assurer une bonne documentation de l'état antérieur et de l'état après l'intervention. On peut aussi intercaler un matériau étanche entre le mur original et le matériau de protection, cela contribuant à bien délimiter les matériaux et à donner un repère d'usure.

• ***Réversibilité***

Toute intervention de « capping » doit être réversible. Ce n'est pas le cas de la plupart des techniques d'imprégnation. Des « cappings » trop adhérents au matériau original peuvent contribuer à sa détérioration. Ce sont là des dégâts irréversibles.

• ***Changement d'apparence***

Si, comme le relevait G. Chiari, tout « capping est affreux », il faut donc veiller à l'esthétique pour que la solution soit la moins laide possible. Essayer

d'approcher la coloration du matériau d'origine en utilisant des terres locales et des pigments naturels.

En conclusion de ce propos très synthétique, M.R. Taylor relève qu'il n'y a pas de « recette » pour réaliser une couverture de protection des murs en terre. A chaque site correspond une solution propre. Et pour un même site, il est souvent nécessaire d'appliquer des solutions différentes, selon les types de murs. Il est généralement admis que les recherches locales sur les pratiques et les savoir-faire sont indispensables, que les solutions développées doivent être réversibles et utiliser au mieux les procédés traditionnels. Enfin, si la question de l'esthétique est importante, l'efficacité de la protection doit garder la priorité, tout en mieux intégrant la nécessité d'un entretien.

III.8. – Le ré-enterrement et autres procédés de stabilisation

III.8.1. – Le ré-enterrement ou « *backfilling* »

Le procédé consistant à ré-enterrer les fouilles après les avoir documentées et si nécessaire, préalablement consolidées, est utilisé par les archéologues et les conservateurs, depuis longue date. Il permet en effet de garantir une bonne préservation tout en autorisant la possibilité de fouiller à nouveau, ultérieurement. Il permet aussi de ré-enterrer des aires fouillées de façon plus « définitive », selon l'intérêt de leur valeur culturelle et les stratégies de mise en valeur définies dans le cadre des plans de gestion. Néanmoins, même si le procédé est reconnu par la grande majorité de la communauté des conservateurs architecturaux, comme l'un des meilleurs procédés, si ce n'est « le » meilleur, de nombreux problèmes n'ont pas été encore réglés et des recherches et expérimentations visent à l'améliorer. Au-delà du remplissage traditionnel à base de sédiments silto-sableux formant une couche de coloration différente, de façon à bien repérer le niveau de fouilles antérieur, le procédé a évolué avec l'utilisation de plus en plus généralisée de « géotextiles », et même plus récemment de « géodrains », destinés à mieux contrôler les effets de l'infiltration et de la percolation de l'eau dans l'épaisseur des sédiments de remplissage. Cette question du drainage des aires ré-enterrées est en effet d'une grande actualité. Nous avons repéré quelques contributions d'auteurs qui pourront apporter un éclairage.

A propos du plan de préservation du site nord américain de Pueblo Grande, **Todd R. Metzger, Larry Nordby et Jim Trot**, (1988, *ibid*), évoquent les techniques de préservation par ré-enterrement (« *backfilling* »). Ces auteurs précisent que les structures destinées à être ré-enterrées, selon leur état de dégradation, doivent être d'abord stabilisées, afin de garantir une bonne tenue de la structure qui sera ré-enterrée. Il s'agit aussi de garantir que les vestiges seront protégés du risque de dégradation ultérieure. Mais, toute intervention de stabilisation ne doit pas compromettre l'esthétique architecturale du site ni l'intégrité archéologique. Ainsi, les techniques de stabilisation ne doivent utiliser que des matériaux compatibles avec les matériaux originaux. Il faut donc proscrire l'emploi de stabilisants « incongrus » tel que barres d'acier, ciment ou autres matériaux non originaux. Les auteurs relèvent toutefois que le « *National Park Service* » a été amené à utiliser des produits consolidants compatibles avec le matériau terre, par exemple du *Rhoplex E-330* et du *MC-76*, du *Daraweld-C*, de l'*Acryl 60*, de l'*Union Carbide R-20*, comme d'ailleurs des sédiments variés disponibles sur le marché. Nous reviendrons sur la consolidation chimique par la suite.

Une fois les interventions de stabilisation effectuées et documentées, le ré-enterrissement peut être opéré. Cette technique implique l'ajout de sédiments stériles, pour renforcer les structures et assurer une protection des vestiges archéologiques. En outre, cette technique permet de contrôler le ruissellement des eaux de surface. Pour les structures en pente ou verticales, l'emploi d'un géotextile est conseillé, de façon à délimiter le niveau des fouilles pour des recherches ultérieures et pour améliorer le drainage et la stabilité structurale. Pour améliorer encore la stabilité des aires ré-enterrées, il est conseillé de planter des essences herbeuses locales. Le sédiment qui doit être utilisé, consiste de façon prédominante en un sable silteux-argileux composé de 70 % de sable et de 20 à 30 % de silts et argiles. Un sable trop argileux serait sujet à expansion. Un sable trop sableux n'aurait pas une bonne cohésion et pourrait opérer des mouvements (déplacements, tassements). Ainsi ce sont bien les sables silteux-argileux qui offrent les meilleures propriétés de compactage et de stabilité pour les surfaces en pente, tout en garantissant une bonne percolation de l'humidité, sans déflexion ni rétention, qui pourraient accélérer la détérioration structurale. Suivant les situations, il peut être aussi nécessaire de prévoir l'installation d'un drain pour améliorer le contrôle de l'humidité de surface.

Discutant la conservation des enduits et peintures du site d'Aztec, Nouveau Mexique, U.S.A., **Constance S. Silver** (1990) observe que deux options semblent faisables pour une conservation à long terme, le ré-enterrissement (« *backfilling* »), ou le détachement. Cette deuxième option exige une consolidation préalable de l'enduit et des peintures murales, vraisemblablement à base d'éthyle silicate, produit alors couramment utilisé. Mais la présence d'une couche synthétique qui a été appliquée auparavant milite contre ce principe de détachement car l'absorption du consolidant peut être empêchée. On ne peut également assurer une homogénéité de ce traitement de consolidation. En conséquence, l'auteur relève que le « *backfilling* » est la solution qui apparaît la plus réaliste. Avant cela, des traitements de conservation doivent être appliqués. Les peintures rouges doivent être traitées avec un adhésif qui pourra assurer une liaison avec le support. Mais, l'usage de tels produits contribue à un changement de coloration. Constance S. Silver relève que l'éthulose (éthylehydroxyéthylecellulose, non ionique), est le seul adhésif qui ne change pas les qualités optiques des peintures et des enduits. Pour ce qui est de la perte d'adhérence, un traitement à l'éthyle silicate pourrait donner de bons résultats. Enfin pour la remise en adhérence des enduits détachés, un traitement au *Rhoplex AC 33* semble approprié.

Pour ce qui concerne la pièce 117, un système de « *backfilling* » a été proposé par le Professeur Norman Weiss, de l'Ecole d'Architecture de l'Université Columbia, préconisant l'emploi de perlite (silicate minéral siliceux amorphe) comme matériau d'optimisation du drainage. Il s'agit de construire un mur en adobe, parallèle au mural à protéger, qui sera rempli de sédiments. Un géotextile sera installé parallèlement au mur qui supporte le mural à une distance d'environ 7.62 cm (3 in.). Cet espace interstitiel sera comblé avec un matériau fin inerte comme des « *Z micrombalons* », ou du sable, pour créer un coussin d'amortissement exerçant une pression uniforme et pour assurer un drainage. Ce coussin peut être aussi réalisé en perlite mélangée à un autre sédiment de « *backfilling* » comme du sable limoneux, de manière à réaliser un remplissage plus léger et doté d'une bonne capacité de drainage.

Dans le cadre d'un programme visant à tester des stratégies de protection des ruines archéologiques, réalisé sur le site de Chaco Canyon (Nouveau Mexique,

USA), le « *National Park Service* » de la région du Sud-Ouest, le « *Chaco Culture National Historical Park* » et la Division de la Conservation de Santa Fe, en association avec le GCI, rendent compte (1991) de propositions de tests sur les solutions de ré-enterriment et de drainage, et de la pose verticale de géodrains, qui ont retenu notre attention.

III.8.2. - Quelques problèmes liés au « *backfilling* » partiel

Les auteurs de ce document relèvent que le ré-enterriment partiel des structures fouillées représente une stratégie pour protéger les vestiges archéologiques qui sont destinés à être présentés au public. Cette stratégie a déjà été employée pour de nombreux sites de culture Chaco, particulièrement à Pueblo Bonito, et s'est avérée être une mesure de conservation à long terme dotée d'un fort potentiel. En effet, à Pueblo Bonito, le ré-enterriment partiel de pièces, ou de zones, a permis de conserver la lisibilité du plan architectural, bien que dissimulant la réelle profondeur des pièces individuelles. Pour compenser ce résultat en deux dimensions, quelques unes des pièces, spécialement des kivas, ont été laissées ouvertes de façon à révéler leur pleine profondeur. Mais, alors que cette méthode de ré-enterriment partiel permet la présentation des ruines aux visiteurs, elle a induit des problèmes qu'un ré-enterriment complet permet d'éviter.

L'une des formes évidentes de détérioration résulte des remplissages différentiels avec des effets manifestes, à première vue, sur les parois verticales exposées des murs qui retiennent le remplissage. Ainsi, un ré-enterriment sélectif et partiel de pièces ou de zones incluses dans la dimension d'un plus vaste complexe architectural, induit une pression inégale sur les murs, une érosion du mortier et une cristallisation des sels sur la face exposée du mur. Le remplissage différentiel ne doit pas être trop important. Il semblerait que la plupart des érosions repérées sur le mortier et sur les pierres puissent être attribuées à une légère différence des niveaux de remplissage entre des pièces adjacentes.

De même, le ré-enterriment partiel peut aussi entraîner une accumulation d'eau dans les pièces, ou inversement une érosion du sol dont la surface a été calibrée pour le drainage, ainsi qu'une croissance de végétation sur la surface du remplissage. Ces problèmes reconnus sur de nombreux sites ont donné lieu à des efforts de recherche visant à réduire les effets d'un remplissage différentiel entre les structures adjacentes et à améliorer le drainage. Des expériences ont été réalisées dès les années 30 par G. Vivian, à Chaco. Ainsi, les auteurs proposent l'emploi de géodrains en pose verticale et horizontale (dans ce cas des panneaux d'*Enkamat 7020*), matériau géosynthétique composé d'une âme pouvant conduire l'eau, recouvert d'un tissu géotextile (*Enkafilter E 43* et géomembrane *Tuff Ply*). Ces géodrains sont prévus pour remplacer les systèmes de drainage traditionnels à base d'agrégats et pourraient ne pas nécessiter d'entretien dans la mesure où ils sont bien conçus. Le système n'est pas résolument nouveau mais doté d'un bon potentiel quant à sa meilleure durabilité, son adaptabilité et son efficacité, vis à vis des méthodes traditionnelles.

III.8.3. - L'efficacité du « *backfilling* »

L'intérêt reconnu du procédé :

Dans sa thèse présentée à l'Université Columbia, **Pamela Stacy Jerome**, (1991, op. cit.), relève les techniques de ré-enterriment des fouilles qu'elle considère comme « le » meilleur procédé de conservation architecturale, pour les parties des sites qui ne méritent pas d'être présentées au public. La technique de comblement, selon **Torraca, Chiari et Gullini** (1972), cités par l'auteur, doit être mise en œuvre après avoir bien documenté l'élément concerné, et doit utiliser un sol stérile doté de propriétés d'expansion et d'absorption de l'eau. Des géotextiles, matériaux synthétiques perméables à l'humidité, ont été utilisés sur le site de Fort Selden. Ce matériau permet au matériau recouvert de « respirer » et à l'eau de s'évaporer. On peut aussi prévoir des imprégnations herbicides. Les protections à base de film de polyéthylène ne sont pas recommandées car le matériau est imperméable et retient des débris organiques, comme des herbes mortes, qui peuvent traverser le film protecteur lorsqu'elles poussent.

L'auteur évoque une pratique antique de ré-enterriment, pratiquée par les Médes, sur le site de Tepe Nush-i-Jan, occupé durant le I^{er} millénaire av. J.C., qui a permis de retrouver les vestiges en parfaite condition lorsque le site a été fouillé en 1965 (d'après **David Stronach**, 1967). L'un des édifices majeurs, le Temple du Feu, avait été comblé avec précaution, avec du mortier de terre, des briques de terre et des plaques de schiste, de façon à ne pas abîmer les structures intérieures. Ainsi, même la voûte en briques a pu être retrouvée intacte. Mais depuis lors, le site, mal protégé, a beaucoup souffert de problèmes de capillarité et a subi d'importantes détériorations.

Rendant compte du « *Chaco Backfill Research Project* », développé dans le cadre d'une collaboration entre le « *U.S. National Park Service* » de Santa Fe, Nouveau Mexique, et le « *Getty Conservation Institute* », Los Angeles, Californie, **Katherine Dowdy et Michael Romero Taylor**, (1990), évaluent les effets du procédé de « *backfilling* » sur des pièces qui avaient été comblées lors des campagnes archéologiques de 1890 et de 1920, de nouveau excavées en 1992. L'objectif du programme de recherche est plus précisément d'évaluer les effets du « *backfilling* » sur la conservation des principaux traits architecturaux que sont les enduits en terre sur les murs et les sols, les mortiers de maçonnerie, la pierre et le bois, principaux matériaux de la culture constructive Chaco.

Les auteurs rappellent que de nombreux archéologues considèrent le procédé de « *backfilling* » comme une technique de préservation valable, sur la base de leurs expériences de fouille et par observation. Mais l'on manque de données scientifiques résultant de recherches expérimentales « contrôlées », données absolument indispensables pour les responsables de la protection et de la conservation des sites archéologiques. Il est nécessaire d'aller « au-delà des intuitions » et de mieux documenter l'efficacité du procédé, de manière à pouvoir donner des recommandations pour le mettre en œuvre le plus correctement possible. Plusieurs archéologues confirment qu'une grande part des objets périssables ont pu être conservés dans un état remarquable (les auteurs citent notamment **George H. Pepper**, 1920), grâce à ce principe de protection par recouvrement de sable. Les vestiges exposés souffrent beaucoup de la pluie, de la neige, des sels et de l'impact des activités humaines. A Chaco, force est-on de constater que les parties exposées ont fait l'objet de dégradations (disparition des enduits en terre originaux), et qu'elles ont dues

être souvent réparées. D'ailleurs, le Service des Parcs a prévu un programme pluriannuel de « *backfilling* » pour plusieurs structures excavées.

Les pièces qui ont été ré-enterrées au début de ce siècle, dans le Pueblo Bonito, après avoir été fouillées et documentées, avaient été auparavant comblées par des pierres, de la terre et des débris accumulés au fil des siècles. Selon la qualité de la documentation de l'époque des fouilles, il est aujourd'hui possible de comparer l'état antérieur à l'état actuel de quelques pièces choisies (97, 85, 83, 62 et 348), après 70 à 90 ans de comblement. Une pièce plus récemment comblée avec du sable, dans les années 70, la pièce 147 a été également choisie pour vérifier les effets du sable comme sédiment de comblement.

Les enduits réalisés par les constructeurs Anasazis recouvraient les parements intérieurs des pièces. C'était de fins enduits en terre argilo-silteuse contenant des sables fins. Leur teinte beige permettait aussi d'éclairer l'intérieur des espaces tout en donnant une sensation de toucher douce et une finition propre. Des couches de suie, entre les couches d'argile, montrent que ces enduits étaient refaits lorsqu'ils avaient été noircis par les fumées des foyers domestiques.

Pour à nouveau exposer des sections de murs qui ont été comblées au début du siècle, des puits-tests ont été creusés, d'une certaine largeur et à une certaine profondeur, de façon à pouvoir documenter l'état par photographie, en noir et blanc et en couleur, à l'aide d'un appareil de petit format (35 mm). Un pied a été utilisé ainsi qu'un objectif grand-angle à décentrement, pour optimiser la qualité de la photographie. Les puits ont été creusés avec précaution, en laissant 30 cm de matériau en tampon contre les surfaces enduites, de façon à éviter que le matériau de comblement encore humide n'affecte les enduits, tout en contrôlant le processus de séchage. Cette épaisseur de 30 cm a été progressivement réduite à 10 cm, en laissant le temps nécessaire pour que le matériau sèche, puis enfin, ces 10 cm restant étaient enlevés avec précaution, après un minimum de 1 à 2 jours. Les enduits originaux ont été protégés de l'ensoleillement direct et des vents abrasifs et desséchant, par des abris temporaires. Une autre méthode de contrôle du taux de séchage a été testée, en humidifiant de nouveau les enduits avec de l'eau distillée, en plusieurs cycles, mais elle a donné des résultats négatifs, en diminuant la stabilité des enduits. Cela met en balance d'autres expériences positives qui ont pu être réalisées pour conserver des enduits, avec du tissu japonais résistant à l'eau. Mais comme le remarquent les auteurs « il n'y a pas en conservation de solution particulière universellement applicable ». Comme cela était prévisible, sous les conditions climatiques arides de la région, l'effet d'un séchage trop rapide a pu résulter en une micro-fissuration, une tendance à la séparation et à l'exfoliation des enduits. Mais ces effets, qui ont été effectivement prononcés durant les 4 premières heures d'exposition, se sont ensuite stabilisés.

• **Résultats préliminaires**

Les tests ont été réalisés avec succès et ont illustré les effets positifs du « *backfilling* » sur la préservation des matériaux architecturaux. On a constaté la présence des enduits dans toutes les pièces testées, avec des degrés différents de préservation. Dans trois des six pièces excavées en 1992, les enduits originaux sont restés dans des conditions très proches de celles qui sont documentées à l'époque des fouilles. Des impressions de mains et de doigts, identifiées en 1897, étaient toujours visibles dans la pièce 97. Les parois en torchis (« *jacal walls* ») de cette pièce étaient en excellente condition, avec leur

matériau végétal ferme et stable. Les enduits en terre étaient également en très bonne condition. Cette conservation remarquable du torchis peut être attribuée, selon K. Dowdy et M.R. Taylor, à l'enterrement de la pièce. Dans la pièce 348, l'enduit était aussi relativement stable mais sa nouvelle exposition au climat aride a contribué à une perte d'une partie de ses couches. Des petites racines présentes dans les couches fines d'enduit ont aussi contribué à cette séparation. Dans la pièce 62 qui montrait un enduit complet et en parfait état, sur les murs nord et ouest, lors des fouilles de 1897, et qui ont été laissés exposés après ces fouilles, le seul enduit qui demeurait a pu être révélé sous la couche peu profonde de matériaux de comblement. Dans la pièce 147 qui a été comblée avec du sable dans le milieu des années 70, l'enduit original est resté en quasi parfaite condition, sec et sans détérioration due à une humidité apparente. Deux des autres pièces du Pueblo Bonito ont révélé un état de condition moins stable. Les excavations ont révélé un dépôt d'apport éolien montrant que ces pièces ont été laissées exposées après les fouilles des années 1890, et qu'elles ont été comblées bien après. Les enduits ont été considérablement érodés par cette longue exposition aux éléments. Dans la pièce 83, une petite partie du sol original avec sa couche de finition, demeurait. Mais la plus grande partie de ce pavement original en terre avait été enlevée durant les fouilles.

Dans toutes les pièces à nouveau exposées, on peut confirmer que les enduits originaux, sur une profondeur de 30 cm depuis la surface, sont affectés par le climat et notamment par les cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel. Au-delà de cette profondeur la condition des enduits est nettement meilleure. Les auteurs observent que c'est là « une considération importante pour déterminer le volume adéquat de comblement dans un « *backfilling* ».

L'épaisseur du comblement est aussi un facteur important jouant sur la détérioration. K. Dowdy et M.R. Taylor observent que les effets de la contamination végétale (racines), des rongeurs et des insectes, comme de l'humidité peuvent être sans doute éliminés en contrôlant mieux cette épaisseur des sédiments de comblement. Un minimum de 1 mètre de sol semble suffisant pour réduire les impacts dévastateurs de ces facteurs.

Des analyses complémentaires de laboratoire sur les matériaux de comblement utilisés à Chaco, portant sur la texture, le pH, la taille des argiles et la minéralogie globale, ainsi que sur le taux de salinité, ont montré que les matériaux utilisés dans les pièces testées sont relativement uniformes. De plus ces matériaux de comblement présentent des propriétés similaires avec les enduits de terre, les pierres et les mortiers. Cela permet aux chercheurs de relever le problème de la compatibilité du matériau de comblement avec les matériaux originaux qu'ils sont sensés protéger.

Enfin, reconnaissant que ce procédé de « *backfilling* » est peu évalué et peu documenté sur ses résultats, les auteurs confirment qu'il a des effets très bénéfiques et qu'il est sans doute préférable pour garantir une bonne conservation des vestiges architecturaux.

III.8.4. Systèmes de drainages

• Drain périphérique

Le procédé est connu. Il vise à favoriser l'évaporation de l'humidité et des eaux ascendantes par le pied du mur en modifiant ses conditions d'exposition. Pour cela, le talus détritique au pied du mur est évacué, le sol rabaissé et l'on réalise une tranchée de 30 cm de profondeur et de 50 cm de largeur à la périphérie du mur, côté intérieur et extérieur. Cette tranchée est remplie d'un lit de galets aéré puis la structure du mur, dégarni en sa base, est stabilisée avec des blocs d'adobe. Le procédé est efficace.

Les géodrains horizontaux

D'autres applications des systèmes de géodrains ont été imaginées en pose horizontale. Car, si le ré-enterriment partiel protège la partie basse des murs recouverts par le remplissage, le processus de détérioration est ramené vers le haut sur la partie non protégée des murs non recouverts. Des systèmes de drainage de la surface de ces ré-enterriments partiels, à partir de couches de terre argileuse devenant imperméables par saturation et drainant l'eau de surface vers un siphon de drainage central, ont été testés. Mais ces couches de protection et de drainage restent très exposées à une érosion et une détérioration par la pousse des végétaux, laissant une voie ouverte à la pénétration de l'humidité dans le matériau de remplissage. C'est particulièrement le cas lors de la fonte lente des neiges. Ainsi, la pose d'un géodrain horizontal permet tout d'abord de drainer l'eau de surface de la pluie, des neiges et la membrane inférieure s'oppose à la pénétration de l'humidité dans la masse du remplissage. De plus, le géodrain est recouvert d'une couche d'agréats perméables (gravier de tout-venant pour les sentiers), qui facilite le drainage, supprime l'érosion et s'oppose à la croissance végétale.

En annexe d'un rapport de relevé des conditions sur l'église Santa Ana du Pueblo de Tamayá, (Nouveau Mexique, USA), **E. Crocker et F.C. Uviña** (1996), évoquent le principe de l'amélioration du drainage de la base des murs au moyen d'un « géodrain ».

L'une des solutions actuelles de type « high-tech » les plus couramment utilisées pour se prémunir des actions néfastes de l'eau et de l'humidité à la base des murs, consiste à utiliser des nouveaux matériaux synthétiques plus connus sous le nom de « géodrains ». Les industriels produisant aujourd'hui ce type de matériaux sont nombreux, avec des applications de plus en plus généralisées sur la construction neuve. Les auteurs rapportent des expériences d'adaptation de ce type de matériaux pour la préservation des architectures de terre, et notamment le procédé « *Miradrain 6000* » qui semble avoir retenu leur intérêt. C'est un matériau de drainage utilisé uniquement sur l'une des faces des murs (généralement extérieure), qui consiste en une âme polymérique avec un aspect extérieur de pastilles. Son épaisseur est d'environ 1 cm et l'une de ses faces est recouverte d'un textile synthétique non tissé qui agit comme un matériau de filtrage, permettant à l'eau de passer mais retenant les terres et les graviers. Ce matériau peut être utilisé de différentes façons. Les auteurs rapportent des expériences qu'ils ont réalisées dans la région de Santa Fe (Jacona et La Barbaria Canyon), sur des murs en terre mal fondés et très détériorés en leurs bases.

Sur le site de Jacona, où les sols alluviaux sableux sont très perméables, une tranchée d'environ 40 cm de profondeur a été creusée le long du mur traité. Puis des réparations de stabilisation structurale ont été effectuées (remplacement partiel de briques détériorées, réfection d'un enduit en terre). Le *Miradrain 6000* a été posé verticalement contre la base du mur, avec sa face géotextile du côté extérieur. Il est maintenu en sa partie haute par une bande solin de tôle galvanisée, elle-même fixée dans le mur avec des clous galvanisés et recouverte de l'enduit du mur de nature perméable à la vapeur. La tranchée est ensuite remplie de graviers roulés de rivière, maintenus en leur partie haute, sur le côté extérieur de la tranchée, par une planchette de bois. Les auteurs comparent ce système à une disposition antique de drainage repéré par J.C. Margueron, sur le site de Mari que l'on a précédemment évoquée.

Sur le site de La Barbaria Canyon, le système a été modifié car les sols sont rétenteurs d'eau. Ainsi, le géodrain a été posé toujours en vertical sur la partie basse du mur, avec sa face géotextile côté extérieur. Il est maintenu par le même système qu'à Jacona mais, le géodrain est inséré dans sa partie basse dans un tuyau de drainage de 10 cm de diamètre environ (4 inches). Ainsi, l'eau récupérée par le géodrain est directement conduite vers le tuyau.

Le système du géodrain peut être adapté différemment. Les auteurs rapportent deux autres expériences, l'une réalisée sur une église, à Upper Rociada, au nord de Las Vegas, et l'autre à Rainsville. Dans le premier cas, à cause de sols très instables au voisinage du mur, le système a consisté en une pose du géodrain dans l'épaisseur d'un talus de drainage, contre la base du mur, qui est prolongé dans une tranchée à l'écartée du mur, elle-même revêtue de ce géodrain et dotée d'un tuyau de drainage percé qui récupérera les eaux pur les évacuer. Du gravier recouvre le tuyau. Pour l'expérience de Rainsville, le procédé est similaire mais a été réalisé sur une couche de bentonite.

Les géodrains verticaux

Une distribution plus équitable des remplissages pour des pièces adjacentes pourrait déjà améliorer considérablement les problèmes résultant d'un ré-enterrément différentiel. Mais cela n'est parfois pas possible à réaliser pour différentes raisons, ou non souhaitable. Il faut donc trouver des solutions pour alléger la pression du matériau de remplissage et bloquer la migration latérale de l'eau à travers le mur. L'installation d'un géodrain vertical peut contribuer à drainer l'eau en excédent dans le remplissage, en réduisant la pression hydrostatique, en prévenant la migration latérale de l'eau à travers le mur, en réduisant le risque de capillarité de l'humidité, en réduisant de fait la cristallisation des sels et donc l'érosion du mortier sur la face exposée de la maçonnerie. La méthode est appropriée pour un emploi dans des pièces qui ont déjà été remplies de sédiments, mais elle implique que l'on creuse à nouveau pour installer le géodrain. Elle est également appropriée pour les pièces excavées destinées à être ré-enterrées. K. Dowdy et M.R. Taylor évoquent ensuite la réalisation de tests sur des pièces adjacentes du Pueblo Bonito (128/340 et 129/341). L'installation de ce système exige une préparation des matériaux, notamment le découpage des panneaux d'*Enkamat*, leur enveloppement par du tissu géotextile, la réalisation des joints entre les panneaux. Autant d'opérations à préparer sur le site. En outre, les géodrains doivent être associés à un système d'évacuation de l'eau à la base du mur et donc ménager des sorties dans la base des murs. Pour simplifier ce procédé, il a été prévu d'enchâsser la partie basse du panneau de géodrain dans une membrane imperméable qui fonctionne comme un drain.

III.8.5. – Protections saisonnières du sommet et de la base des murs

Des solutions de protection saisonnière ont été également testées pour les périodes de l'hiver et de printemps durant lesquelles les murs sont sujets à une accumulation de neige sur leurs sommets et en leurs bases. L'eau qui pénètre dans les murs et qui est exposée au gel-dégel, cause des dégradations sensibles aux matériaux des murs.

• Couverture saisonnières du sommet des murs

Les formes de « *cappings* » actuels sont principalement réalisées au mortier de sable-ciment. Ils réduisent la pénétration de l'eau dans le mur mais ne l'éliminent pas totalement. Ainsi, il est proposé de couvrir selon la saison le sommet des murs par une membrane qui s'oppose au risque d'infiltration. Cette membrane permet aussi de réduire l'entretien consistant notamment à évacuer la neige du sommet des murs, régulièrement. Il est proposé de tester plusieurs types de membranes :

- un composite de *Tuff Ply* (tissu polyester et résistant aux UV), géotextile non tissé de couleur gris sombre. Ce matériau est retenu pour son aspect un peu rugueux permettant de mieux retenir la neige ;
- une géomembrane de type Cooley, qui est imperméable, de couleur dorée mais plus lisse et qui peut ne pas retenir la neige aussi bien ;

Ces deux types de membranes sont lestées de part et d'autre du sommet recouvert, par des liteaux en bois enchâssés dans une autre portion de membrane reliée par des systèmes d'oeillets et de fils de fer, à la membrane de recouvrement. Les liteaux sont maintenus écartés du mur par une pierre posée sur le sol et attachée par un fil de fer tendu. Un cordon de silicone, sur la membrane enchâssant les liteaux de bois, côté extérieur, fait office de goutte d'eau pour éviter que l'eau ne ruisselle contre le mur.

• Protection de la base des murs

Les méthodes proposées consiste à inclure soit un géodrain avec une géomembrane en sous-face dans un talus de drainage réalisé en matériaux drainant, à la base des murs, soit uniquement une géomembrane. Ces matériaux remontent du côté de la base du mur et suivent la pente de drainage, jouant ainsi un rôle de système d'évacuation de l'eau de surface vers l'extérieur du mur.

Cette expérimentation novatrice traduit tout de même un certain niveau de complexité de mise en œuvre guidé par le souci des chercheurs, de maîtriser simultanément un ensemble des paramètres agissant directement sur l'efficacité du procédé de « backfilling ». Nous n'avons pas connaissance des résultats du « monitoring » de cette expérimentation, ni de la hauteur d'investissement, qui mériteraient d'être comparés avec l'efficacité et le coût moyen d'autres procédés plus couramment exploités. Ne serait-il pas intéressant de développer les recherches en application du principe de tests simulés, comme on a pu le faire pour les recherches sur la stabilisation et la consolidation des protections de surface, sur des « murs-tests » ?

III.8.6. Autres systèmes de protection

• *Protection aérienne par géotextiles tendus*

Très peu d'expériences de protection par géotextiles en habillage ou en recouvrement ont été tentées. Dans le Bulletin US/ICOMOS n° 10 de l'année 1994, **Thomas J. Caperton**, présente une évaluation des systèmes de protection en géotextiles qui ont été testés à Fort Selden. En effet, environ 180 mètres linéaires (592 pieds) de murs ont été recouverts avec des géotextiles en polypropylène tissé, en décembre-février 1992-93. Ce test de protection était associé à une enquête d'impact sur les visiteurs visant à évaluer leur acceptation du procédé. Pour être plus précis, les géotextiles utilisés étaient de deux types : du *Mirafi 600X* et *700X* (Produits de *Mirafi Inc.*, Charlotte, Caroline du Nord, U.S.A.).

Après un an et demi d'exposition aux conditions climatiques dures de l'environnement désertique, le géotextile *700x* a commencé à se détériorer et quelques parties ont été enlevées. Le *600X* qui présente un tissage plus serré est resté intact. Ce matériau contient du noir de carbone qui retarde la dégradation solaire (U.V.).

Les systèmes de protection qui ont été testés incluent soit l'enveloppement de parties de murs avec le géotextile, soit la mise en tension du géotextile sur des cadres en bois. Le maintien est assuré par des fils de nylon. Dans certains cas limités, le matériau a légèrement érodé des parties de mur protubérantes, mais cette érosion est minime et moindre que l'érosion naturelle. Par contre l'humidité a pénétré dans les murs enveloppés sans pour autant causer de dommages significatifs aux vestiges. Une fois découverts, en séchant, les murs restent identiques. Le géotextile contribue à résoudre les problèmes de l'impact de la pluie sur les murs.

Pour les systèmes de protection en forme de toile tendue au-dessus des murs, le géotextile n'est pas en contact avec les murs d'adobe. L'eau qui pénètre par le géotextile s'écoule à l'intérieur de l'abri comme elle le ferait sur une tente. On observe aucune humidité sur les murs. Le géotextile donne aussi une protection contre les vents abrasifs qui frappent les vestiges durant les tempêtes de sable du printemps.

la mauvaise acceptation des visiteurs, qui considèrent cette initiative radicale totalement inacceptable, a conduit à rejeter ce principe de protection. Il a fallu clairement signaler qu'il s'agissait d'un programme expérimental visant à préserver les vestiges du Fort qui, au taux actuel d'érosion enregistré, pouvait totalement fondre en 50 ans. Les visiteurs ont été questionnés sur leurs préférences quant à une future présentation des ruines. Sur 248 réponses, l'enquête a relevé les points de vue suivants :

- permettre aux ruines d'opérer leur processus naturel de dégradation (21 réponses) ;
- recouvrir le site de terre afin de le préserver pour les générations futures (10 réponses) ;
- mettre en place une équipe permanente d'entretien et enduire les murs chaque année (54 réponses) ;
- sauver le Fort à tout prix. Construire des structures de protection au-dessus des ruines (80 réponses) ;
- appliquer de façon sélective les alternatives *supra* proposées (83 réponses).

40 répondants ont déclaré qu'ils voudraient voir le fort reconstruit, bien que cette alternative n'était pas proposée. Le matériau original ne représentait pas une préoccupation de première importance. Les visiteurs ne voulaient pas non plus voir le site entièrement couvert.

III.9. Traitement de l'humidité capillaire et des dépôts salins

L'érosion de la base des murs en terre, du fait de l'action des remontées d'eau ou d'humidité capillaire, associée à d'autres facteurs, comme, entre autres, les sels solubles qui cristallisent lors du processus d'évaporation, est sans doute l'une des pathologies les plus typiques. Les modes d'intervention sont multiples et connus, bien qu'issus de méthodes en nombre limité, et d'une efficacité toute variable compte tenu de la dépendance des traitements aux facteurs du milieu ambiant, physique (nature des sols), climatique (régime de précipitation et orientation) et même socioculturel et économique (pratiques d'entretien). Nous avons repéré plusieurs contributions dans la littérature évoquant ces procédés d'intervention connus mais on doit reconnaître que très peu de données restituent le traitement des dépôts salins sur les murs en terre alors que la littérature couvre plutôt bien la question pour d'autres types de maçonneries (pierre, brique cuite). Mais, la porosité du matériau terre étant supérieure à celle de ces autres matériaux de construction, il semblerait que le traitement des dépôts salins, au-delà du nettoyage de surface avec des procédés connus et pratiqués par les conservateurs, ait davantage à voir avec l'optimisation du drainage et de l'évaporation (respiration), de l'humidité présente ou remontant à la base des murs.

III.9.1. - Les principales méthodes connues

Lors des journées de Madrid (1989, *supra* référencées), **Fernando Pinilla Velasco** a exposé diverses méthodes d'élimination de l'humidité capillaire. Il distingue les principales méthodes suivantes :

- le drainage du terrain périphérique au bâtiment ;
- l'imperméabilisation du mur en contact avec le terrain ;
- le drainage et l'aération des murs ;
- l'insertion à la base des murs d'une chape étanche ;
- l'injection de mortiers ou de produits hydrofuges ,
- l'électro-osmose ;
- l'électrophorèse.

Ce sont là en effet, les principales méthodes connues et jusqu'alors principalement appliquées aux édifices construits en pierres ou en briques cuites. Mais qu'en est-il pour la terre crue ? Les systèmes de drainage proposés sont assez classiques et l'on retiendra le principe du drainage à la française, avec buse de récupération de l'eau en fond, mais construit à l'écart de la base du mur. Entre ce drain et le mur, un petit talus en pente permet d'évacuer les eaux de ruissellement vers le drainage. Encore faut-il que le matériau qui recouvre ce petit talus ne constitue pas une barrière à l'évaporation. Pour ce qui est des systèmes de drainage avec une imperméabilisation de la surface des matériaux enterrés, nous restons septique quant à leur efficacité pour des sols qui seraient sujets à une présence d'humidité en profondeur (percolation et rétention par saturation de sols argileux peu drainants, par exemple, ou remontées de la nappe phréatique), car l'humidité qui pourrait remonter par la base du massif de fondation, ou par les sols intérieurs, serait alors piégée par cette imperméabilisation, engageant ainsi un processus de réduction de la

résistance du massif de fondation. Plus intéressant semble être le système de drainage incluant des buses de filtrage verticales, qui pourraient aussi jouer le rôle de petites « cheminées » d'aération ou d'évaporation. Mais nous insistons encore sur les risques que peut générer l'introduction de matériaux imperméabilisant pour les parties enterrées, sauf bien sûr en cas de sol solide filtrant et pour des régimes de pluie peu importants. Les systèmes d'intégration de drains d'aération dans les murs, généralement à leur base, nous semblent relever davantage d'un traitement de pis-aller dans la mesure où ils ne solutionnent pas du tout le problème en intervenant sur ses causes originelles. Ce peut être néanmoins une solution provisoire pour assécher les poches d'humidité mais ce sont des interventions relativement destructives. L'insertion d'une chape étanche à la base des murs (feuille de plomb ou autre matériau imperméable) est une solution assez radicale et efficace mais qui oblige à réaliser un gros chantier, coûteux et pouvant être périlleux pour la stabilité des structures. Il s'agit en effet de prévoir des solutions d'étalement provisoire des structures et là encore, inévitablement, les interventions présentent un caractère destructif, ne serait-ce que pour mettre en place les systèmes d'étais. Quant à l'injection de produits hydrofuges, nous en connaissons toutes les limites, les risques et aussi l'efficacité, assez variable, en rappelant que ces solutions sont très dépendantes de la nature du matériau, de la morphologie du réseau capillaire, de ses propriétés de porosité, des contraintes climatiques locales, des types de produits, autant de facteurs qui rendent les résultats incertains et qui interdisent ici d'évoquer des « recettes ». On se reportera aussi sur cet aspect à une évocation plus détaillée des solutions de consolidation chimique. Enfin, pour l'électro-osmose, basée sur le principe de l'activation de la circulation de l'humidité à l'état liquide sous l'influence d'un champ électrique qui annule les forces capillaires ascensionnelles, on connaît mieux aussi aujourd'hui les limites d'efficacité des procédés, très liées également à la nature du matériau, à sa porosité, à la morphologie du réseau capillaire. Les résultats ne peuvent être généralisés et doivent être considérés avec réserve. L'électrophorèse agissant davantage sur les particules en suspension dans l'eau, sous l'effet d'un champ électrique, cataphorèse ou anaphorèse, selon le mouvement des particules vers la cathode ou l'anode, respectivement, peut présenter un intérêt pour le traitement de la salinité mais les résultats sont aussi extrêmement variables. Soigner les phénomènes et les symptômes n'est hélas pas suffisant pour apporter des solutions aux problèmes lorsque l'intervention sur les causes est trop souvent négligée, ce qui est le cas pour ces deux derniers procédés que des auteurs ont plus précisément évalué.

III.9.2. - Quelques solutions « antiques » repérées à Mari, Syrie.

• Canalisations d'aération

J.C. Margueron (1993), à propos de techniques de prévention développées par les occupants antiques de Mari, Syrie, évoque l'existence de canalisations disposées dans le sous-sol des pièces et parallèlement aux murs, construites en deux assises de blocs d'adobe et recouvertes par deux autres assises d'adobe. Ces canalisations sont donc « invisibles ». Le système n'est pas étanche et l'archéologue en conclut qu'il s'agirait plutôt de canalisations d'aération. Par ailleurs, il est intéressant de noter que ces canalisations n'auraient pas été réalisées lors de la construction mais lors d'une phase plus tardive (réparation, restauration).

• *Optimisation des drainages en bas de mur*

Toujours à propos de techniques de prévention repérées à Mari, J.C. Margueron (op. cit.) évoque l'existence de drainages de galets recouverts de terre, réalisés le long des deux parements intérieurs et extérieurs des murs d'adobe. Selon lui, le système était vraisemblablement destiné à favoriser la ventilation de la base des murs, évitant ainsi une trop grande concentration d'humidité et de sels.

• *Radiers de sols en galets*

J.C. Margueron (ibid) note aussi l'existence de radiers épais de galets réalisés sous les sols des pièces et qui sembleraient avoir été mis en place pour limiter les effets négatifs des sels remontant avec les mouvements de la nappe phréatique.

III.9.3. - Plinthe perméable

Mahmoud Bendakir (1993, op. cit.), rend aussi compte d'autres expérimentations de conservation qui ont été entreprises à Mari. Il s'agit d'optimiser l'évaporation de l'humidité, par la réalisation d'une « plinthe perméable », associée à un drainage des sols, en base des vestiges en briques d'adobe.

Les conditions d'évaporation ainsi que la teneur élevée en sels résultant de mouvements de la nappe phréatique, à Mari, sont à l'origine de la formation d'un « sillon destructeur », à la base des murs. En l'absence de soubassement, l'humidité remonte dans la base des murs et s'évapore au contact de l'air, déposant des sels qui cristallisent et diminuent la cohésion des argiles, provoquant la création de ce sillon destructeur qui affecte considérablement la stabilité des murs. Le procédé proposé par M. Bendakir et qui a été expérimenté, consiste à amener l'évaporation et la cristallisation des sels à se produire hors du mur de terre, soit dans un matériau appliqué en parement du mur, en dessous du sillon destructeur. Ce matériau rapporté doit être résistant à l'action des sels et présenter une bonne perméabilité à l'humidité accumulée dans le mur. Il doit aussi offrir une grande capacité d'absorption de l'eau capillaire, garantir un bon accrochage contre le mur pour assurer une continuité des migrations d'humidité entre le mur et la plinthe perméable, être durable dans le temps. Une expérimentation a été réalisée sur le mur sud du palais présargonique dont la partie basse était très affectée par le phénomène du sillon destructeur. Des mèches de coton brut sont grossièrement façonnées puis trempées dans une barbotine d'argile liquide, jusqu'à saturation. Ces mèches sont alors immédiatement appliquées sur le mur pour former un emplâtre de 2 cm d'épaisseur. Une natte de roseaux est ensuite clouée directement au mur de façon à maintenir en place les mèches de coton et à les protéger des dégradations ultérieures. Ce système est ensuite protégé par un drain lui-même recouvert d'une forme de pente en terre. Le document de l'auteur ne rend pas compte des résultats l'expérience étant alors au stade initial. Mais l'on sait que le principe, contrôlé lors de campagnes successives de conservation, a été conservé pour cette partie du site, sans pour autant avoir été généralisé.

III.9. 4. - Electro-osmose et électrophorèse

• *Electro-osmose*

A l'occasion de la conférence « Adobe'90 » **Michel Dubus**, du Musée national de Céramique de Sèvres, France, fait le point sur les possibilités de l'électro-osmose pour la conservation de l'architecture de terre.

Michel Dubus rappelle que « l'origine de la charge électrique des particules d'argile est expliquée par plusieurs théories :

- la théorie électrochimique qui admet que les molécules d'argile sont ionisées par l'eau se trouvant entre les feuillets ;
- les théories basées sur l'absorption des OH⁻ en des points stratégiques du cristal ;
- les théories supposant les liaisons de valence non saturées, provenant de la répartition irrégulière des ions des constituants de l'argile ;
- par la présence d'aluminium libre qui se comporterait comme un accepteur d'électrons sur certaines faces des cristaux d'argile. »

Au regard de **Léo Casagrande** (1947), l'électro-osmose pour les sols formés de particules < 2 µm et jusqu'à 4 µm, est définie comme étant « un mouvement forcé de l'eau d'une électrode à l'autre (l'une positive et l'autre négative), faisant circuler un courant électrique entre deux électrodes, l'une placée dans le mur et l'autre à l'écart de celui-ci, de sorte que l'eau se déplace de la première vers la deuxième ». D'après Y. Atlan (1968), « la conductivité d'un milieu aqueux est augmentée dès qu'il y a présence d'argile ».

Michel Dubus rappelle que le procédé d'électro-osmose a été très utilisé pour l'amélioration de la stabilité des sols argileux avec les résultats les plus représentatifs pour des sols argileux contenant des sables, des graviers et des blocs.

L'auteur rappelle les paramètres influents sur le débit électro-osmotique, qui est proportionnel:

- à la densité de courant électrique ;
- à la section des capillaires ;
- à la résistivité électro-osmotique du milieu ;
- au potentiel électrocinétique ;
- à la constante diélectrique du milieu.

Il propose donc, sur ces bases qu'une manipulation en vraie grandeur et dans des conditions réelles soit envisagée, tout en rappelant que théoriquement, le principe ne peut fonctionner qu'en présence d'électrolyte, c'est à dire qu'il nécessite de l'eau. L'un des avantages relevé par Michel Dubus est que le système est autorégulé, et donc qu'il ne demande pas d'entretien particulier une fois le « seuil de déclenchement » établi. Mais le procédé exige une mise en œuvre soignée, notamment au niveau des connexions qui ne doivent pas s'oxyder.

Dans son ouvrage déjà référencé et révisé dans notre deuxième chapitre, **Raymond Collombet** (1984, 1987, op. cit.), fait le point sur les procédés de traitement de la capillarité par électro-osmose et électro-osmose phorèse. L'auteur ne référence pas directement leur application ni leur utilité pour le traitement de ce problème sur les maisons en terre mais le propos tenu présentent des arguments qui méritaient d'être rappelés.

Collombet relève qu'il existe de nombreuses applications développées à partir du brevet original de Ernst et que ces applications ont connu des succès « divers ». Il s'agit de dépasser les querelles d'experts et de rappeler à juste titre que le procédé ne s'attaque pas à la cause du mal mais à ses effets. Dès que le traitement est interrompu, l'humidité réapparaît. Or, on n'est pas à l'abri d'une rupture accidentelle ou même d'une corrosion des conducteurs, dans le temps. Par ailleurs, pour que l'électro-osmose fonctionne, il faut que le courant fonctionne dans le bon sens, ce qui est difficile à assurer dans les zones où il existe des courants « vagabonds ». Collombet ne condamne pas complètement le procédé qui peut présenter une efficacité là où d'autres traitements ont été inefficaces, mais il précise qu'il convient d'adopter les précautions suivantes :

- préférer un système d'électro-osmose « active » plutôt que « passive » ;
- vérifier au préalable la résistance électrique du sol qui ne doit pas être trop élevée (de l'ordre de 15 à 20 ohms) ;
- contrôler la bonne marche du système, régulièrement, pour pallier rapidement d'éventuelles déficiences ;
- rejeter cette solution là où existent des courants vagabonds (proximité de voies ferrées p.e.).

Par ailleurs, un rapport sur « l'Application de l'électro-osmose à la sauvegarde du patrimoine culturel » établi par le Département Systèmes Energétiques de la firme française EDF (Electricité de France, 1992), fait apparaître en document annexe, une hypothèse sur le manque d'efficacité de systèmes électro-osmotiques testés par le Centre Scientifique et Technique de la Construction de Belgique, qui pourrait être attribué « à des problèmes de contact avec les maçonneries ou au fait que les effets osmotiques de dilution des sels, (présents en quantité dans les anciennes maçonneries) et favorisant les remontées capillaires, peuvent en tout ou partie, contrarier les effets de l'électro-osmose. »

• **Électro-osmose phorèse**

Collombet relève que ce procédé présente un avantage sur l'électro-osmose car son utilisation ne peut nécessiter qu'un temps limité au-delà duquel les capillaires sont colmatés et l'ascension capillaire stoppée. Mais encore faut-il que l'efficacité du produit hydrophobe de phorèse électro-injecté soit garantie, et cela dépend en grande partie de la morphologie du réseau capillaire. Le procédé reste coûteux et son fonctionnement, notamment au démarrage, n'est pas toujours garanti. Le procédé a évolué depuis cette époque mais aucune évaluation complète n'a encore été réalisée, au-delà des arguments présentés par les commerciaux. Par ailleurs, peu de tests ont été réalisés sur les maçonneries en terre.

III.9.5. - Drains atmosphériques

La méthode consiste à assécher les murs à l'aide de siphons (ou drains) atmosphériques, c'est à dire à forer des trous (environ 2/3 de l'épaisseur des murs), dans lesquels sont implantés des tubes poreux protégés en leurs extrémités par des grilles. La distance entre chaque siphons est d'environ 30 à 40 cm et leur inclinaison dirigée vers le bas varie selon un angle de 10 à 30 °. Le procédé imaginé par **Knapen** est basé sur les échanges entre l'air sec extérieur et l'air humide intérieur. Ce procédé simple et relativement peu coûteux a conquis le monde. *Mais le procédé ne résout souvent pas entièrement le problème de rétention d'humidité capillaire qu'il n'évacue pas complètement. Par ailleurs, il faut que ces siphons soient bâtis avec un mortier plus avide d'eau que le matériau du mur, et que le matériau du siphon soit lui aussi plus avide d'eau que le mortier de pose. Le contact entre la maçonnerie et*

le mortier, et entre le mortier et le siphon, doit être parfait pour garantir des échanges entre les matériaux. Considérant la relative haute avidité de la terre, on voit difficilement quels matériaux, en mortier et en réalisation des siphons, peuvent être plus avides d'humidité. Par ailleurs, les précautions de mise en œuvre ont l'air trop importantes pour garantir une efficacité somme toute tout à fait relative. Sans compter que le forage de trous (opération destructive) peut aussi contribuer à créer des ponts thermiques et des phénomènes de condensation, en période froide. Nous disons volontiers ici, que ce procédé ne semble pas très approprié pour les maçonneries de terre.

Dans le même registre d'intervention et à propos de la restauration de parties de murs en adobe d'une chapelle située à Chicligasta, Argentine, affectés par la capillarité, **Arnaldo Juan Pujal** (1993, op. cit.), évoque la création de trous de ventilation dans l'épaisseur du mur (1,20 m), d'un diamètre de 30 à 50 cm, disposés tous les 90 cm. Puis un grillage est posé, recouvert d'enduit. Cette opération de caractère destructif, s'est avérée efficace.

III.9.6. - Nettoyage des sels

Très peu d'information est rapporté dans la littérature sur la question spécifique du nettoyage des sels solubles. Outre l'évocation antérieure de Ana Maria Hoyle, on aura repéré une brève contribution de **Constance A. Silver** (1990), évoquant ses travaux réalisés sur des peintures murales des pueblos du Sud Ouest des U.S.A. Elle note que les efflorescences salines ont été nettoyées à l'aide d'une brosse et de sable. Les sels les plus tenaces ont été traités à l'aide d'une compresse de pâte à papier infusée avec une solution saturée de bicarbonate de soude. La compresse a été appliquée durant 5 heures. Puis l'on a appliqué des compresses d'eau distillée. Environ 50 % des sels ont pu être nettoyés sans causer aucun dommages aux peintures et enduits.

III.10. - Interventions sur les structures, réparation des murs, rebouchage des fissures

Il est étonnant de constater que la littérature ne traite que très peu la question de la stabilisation structurale des maçonneries en terre. Le propos principalement développé concerne finalement la question de la reprise et du rebouchage des fissures structurales, ou de la réintégration de trous et cavités, qui, certes, sont des aspects importants de la question. On aura remarqué une lacune d'information sur ce qui concerne la reprise des fondations détériorées. On peut être ainsi incliné à penser que, du fait de l'instabilité des fondations causant le plus souvent l'effondrement des murs, c'est davantage la réparation, voire la reconstruction des murs, y compris leurs fondations et soubassements, qui focalise l'intérêt des opérateurs. La question des mortiers d'appareillage, pour les maçonneries en adobe, est aussi trop rarement abordée. De même les interventions de stabilisation, ou de réintégration des maçonneries en adobe, elles-mêmes, qui sont pourtant, dans les faits pratiques de la conservation des architectures de terre couramment pratiquées mais qui semblent, peut-être, « aller de soi » pour que l'on ait à l'évoquer de façon très limitée. Rares également sont les contributions sur la stabilisation des maçonneries en pisé. Enfin, on aura relevé des contributions récentes couvrant la stabilisation structurale des maisons en bauge, apportées par les conservateurs britanniques, qui ont investi le champ de la conservation du patrimoine vernaculaire (en Devon, notamment), en définissant et appliquant des modes d'intervention spécifiques. Les contributions que l'on aura relevé viennent

compléter les énoncés à caractère généraliste que l'on a présenté au début de ce chapitre, posant davantage, en terme de recommandations, les principes d'une philosophie, et d'une attitude d'intervention « appropriée ». On s'y reportera simultanément pour recadrer ou « pondérer » les aspects techniques de la question.

III.10.1. - Qualité des mortiers

A propos d'une recherche effectuée dans le cadre du projet Smeaton, mené par « *English Heritage* », en association avec l'ICCROM et l'Université de Bournemouth, **J.M. Teutonico, I. McCairg, C. Burns et J. Ashurst** (1994), rendent compte des facteurs affectant les propriétés des mortier à base de chaux. Nous relèverons les conclusions de la recherche qui nous ont semblé adaptables, d'un point de vue « théorique », aux mortiers de terre.

Bien sûr, « une bonne pratique de conservation exige un maximum de compatibilité et une intervention minimale de façon à ce que le nouveau matériau, en l'occurrence le mortier de réparation, puisse coexister avec le matériau ancien ». Mais les auteurs relèvent trois points qui méritent une attention particulière :

1 - Les matériaux utilisés aujourd'hui ne sont pas toujours les mêmes que ceux utilisés par les constructeurs dont le travail doit être conservé et réparé - même si on la même dénomination, celle de « mortier ».

2 - Les matériaux ne sont pas toujours utilisés de la même manière. Même si les analyses peuvent indiquer les ingrédients composant un mortier, cela n'indique en rien comment le mortier était préparé et utilisé. Il faut donc parfois rechercher les pratiques et les savoir-faire et cela se fait par la méthode des essais et des erreurs (adaptation). Donc la recherche de laboratoire doit être impérativement corrélée avec la recherche de terrain.

3 - Les exigences de performance d'un mortier de réparation peuvent être très différentes de celles du mortier original. Les auteurs relèvent le fait qu'un bâtiment ruiné qui est resté exposé à l'eau et au gel, non protégé, se comporte différemment qu'un bâtiment bien couvert et occupé. Dans une telle situation, le mortier de réparation devra posséder une plus grande résistance aux dégâts au gel et aux sels que le mortier d'origine.

III.10.2. - Réparation des structures en bauge

Dans le bulletin N° 2 de la « *Historic Buildings Trust* » du Devon (U.K.), **Larry Keefe** (1993), développe la question de la pathologie et de la réparation des maisons traditionnelles en bauge. Nous avons retenu plusieurs aspects du propos développé par l'auteur. Tout d'abord pour ce qui relève d'une attitude de travail spécifique, puis pour des principes et des modes d'intervention visant à traiter différents niveaux de problèmes : traitement des trous et cavités, des dégradations causées par la faune.

• *Principes de réparation*

Larry Keefe pose le problème de la réparation des maisons en bauge en des termes spécifiques. Il montre que l'attitude de travail est totalement différente que pour les structures en pierres ou en briques cuites, car les structures en

bauge sont « monolithiques » et présentent un comportement différent de celles construites en maçonnerie.

Du fait que les murs en bauge sont au moins épais de 500 à 600 mm, la question de l'érosion de surface n'est pas en soi, un gros problème. Par ailleurs, le rebouchage des fissures et des trous ou cavités n'est pas si difficile car la liaison mécanique entre les matériaux de réparation et originaux s'obtient assez facilement. Mais il ne faut jamais tenter de redresser un mur qui serait déformé par l'emploi de systèmes de levage ou autre système. Les murs doivent être réparés tels qu'ils sont, sauf peut-être lorsque un faux aplomb, extérieur ou intérieur est trop important. Il faudra alors peut-être envisager, mais avec précaution, de démonter ces murs présentant un important dévers et de les reconstruire. La philosophie de « l'intervention minimum », qui est prônée par les chartes de la conservation est bien celle qui sied le mieux pour les constructions en bauge. Ainsi, le but consiste à réparer et à consolider, sans causer de rupture physique, tout en garantissant une stabilité à long terme et une performance optimale.

• **Les matériaux à utiliser**

Récemment, beaucoup de murs en bauge ont été réparés avec de la pierre ou de la brique cuite bâties au mortier de ciment. C'est un grave problème car ces matériaux se comportent différemment que la terre et car leur liaison mécanique avec la terre est souvent déficiente. Réparer une maison en bauge avec de tels matériaux, c'est comme si « l'on battait un mauvais garnement avec une ceinture de cuir ». Les effets à long terme sont désastreux. L'un des effets résultant de l'insertion de matériaux relativement imperméables est le blocage de la migration de vapeur d'eau avec une rétention d'humidité à l'interface des matériaux nouveaux et anciens. Ce type d'intervention peut avoir des conséquences de dommage structural, d'autant plus que la liaison mécanique n'est pas bonne. Egalement, lorsque l'on enduit les murs avec du ciment. Le bois est peut-être le seul matériau structural qui soit compatible avec la bauge car il est à la fois flexible et perméable à la vapeur tout en ayant un bon rapport de résistance par rapport à son poids, si on le compare à l'acier ou au béton armé. Le chêne, par exemple, ajoute à ces qualités sa durabilité et sa résistance aux dégradations. Ainsi, le bois peut être avantageusement utilisé pour remplacer des renforcements en béton et en acier. Il est clair que les meilleurs matériaux sont ceux qui présentent la même intégrité historique que les maisons en bauge, c'est à dire la terre et la paille, même s'il faut recouvrer un savoir-faire par l'expérience renouvelée.

Les principes de réparations présentés par Larry Keefe peuvent être rapprochés d'autres procédés présentés par Barry Honeysett (1995) lors du colloque « *Out of Earth* » organisé par l'Université de Plymouth (U.K.), auxquels l'on pourra aussi se reporter.

• **Reconstruction de murs effondrés**

Lors de la reconstruction d'un mur en bauge, le problème qui se pose est celui de la fissuration de retrait et de la liaison mécanique entre le nouveau mur et l'ancien. Les sols argileux peuvent opérer un retrait de l'ordre de 15 à 30 mm, sur 1 mètre de longueur, et l'on voit apparaître des fissures à la fois verticales et horizontales. Par ailleurs, plus le mur est construit rapidement, plus il peut opérer un tassement, du fait que la charge exercée sur le sol augmente vite. Il faut donc prendre son temps. Si les terres locales sont trop argileuses, elles

peuvent être amendées en sables grossiers pour réduire ce risque de retrait. Ce retrait peut aussi être mieux contrôlé en construisant à un état plus sec et en compactant le matériau, comme on le ferait pour du « pisé ». Au cours du XIX^{ème} siècle, il était courant de rajouter de la chaux à la terre, pour pouvoir construire plus rapidement. Mais de récentes expériences de reconstruction montrent que cela n'est pas nécessaire, sauf peut-être pour réparer des dommages mineurs où il faut absolument contrôler le retrait, tel que rebouchage de fissures ou de cavités. L'ajout de 5 à 10 % de chaux non hydraulique (de chaux « naturelle » hydratée), selon la quantité d'argile, peut réduire ce retrait de 50 %. Cela permet en outre de réparer plus vite et d'obtenir de meilleures résistances du matériau. Lorsque l'on répare un mur de bauge, il est préférable de réaliser des joints verticaux ou en biais, de façon à contrôler le tassement et le retrait du nouveau matériau et à éviter le développement de nouvelles fissures. L'introduction de pièces de bois verticales, dans l'épaisseur du mur, à la liaison entre un nouveau mur et l'ancien, peut constituer des clés s'opposant au cisaillement et aussi un support pour de futurs chaînages en bois ou pour les poutres. Toute petite fissure de retrait qui apparaît peut être obturée en compactant du matériau à l'aide d'un fer à béton ou outil similaire. Si le mur effondré présente une longueur trop importante, il faudra alors prévoir des supports structuraux pour les poutres de plancher et les pièces de charpente. Des planches en bois peuvent être insérées plutôt que des chaînages en béton, ainsi que des potelets en bois imputrescible (chêne), dans l'âme du mur, pour supporter ces pièces de structure de plancher et de charpente.

• *Réparation de trous et cavités*

Dans tous les cas il faut éliminer le matériau ancien dégradé ou pulvérulent qui pourrait demeurer dans la cavité traitée. Il convient aussi de bien régler la forme de cette cavité en réglant ses bordures. On peut aussi prévoir d'insérer des systèmes d'accrochage avec des morceaux de bois, des gros clous d'acier galvanisé, ou des connecteurs en métaux non ferreux. Avant de reboucher les cavités, il convient de bien mouiller pour obtenir une bonne adhérence. Dans des situations plus exposées à l'érosion ou à l'abrasion, tel que les angles, le voisinage des tableaux de portes et fenêtres, il est conseillé de rebâtir plus généreusement la maçonnerie dégradée en utilisant des blocs de bauge moulés bâtis au mortier de terre.

• *Domages dus aux rongeurs*

Il faut bien évaluer les dégâts causés par la faune ambiante. Les tunnels peuvent être bien réparés dans la mesure où l'on identifie bien leurs entrées et leurs sorties. On peut alors injecter un mortier de sable et de chaux mêlé d'agréats. Mais les dégâts causés par les rongeurs peuvent être très importants. Ils peuvent creuser des galeries dans toute l'épaisseur des murs, généralement juste au-dessus des soubassements et le plus souvent dans des bâtiments de grange, plus que d'habitation, y trouvant leur nourriture. Ces cavités plus larges doivent être bien nettoyées et leur forme bien réglée, avant de les bourrer avec du mortier de terre stabilisé à la chaux, compacté, ou avec des blocs de bauge moulés bâtis au mortier de terre. Si ce sont de gros travaux de reprise de la maçonnerie de bauge, il faut alors prévoir de les réaliser progressivement, sur une longueur maximale de 1 m et prévoir de supporter la structure du côté intérieur, notamment le plancher.

III.10.3. - Réparation des structures en pisé

La littérature disponible que nous avons révisée reste assez limitée sur cette question. On aura relevé deux contributions de caractère généraliste.

Dans une plaquette intitulée « *Restauracion y mantenimiento de las casas de Labranza del Somontano en al Alto Aragon* », éditée par la « *Diputacion General de Aragon* », nous avons relevé un propos de **Antonio Naval Mas** (1990), évoquant un principe de restauration des pisés détériorés en façade (écroulements partiels ou grosses cavités à reboucher). Le principe présenté consiste à régler la découpe des lacunes de pisé puis à intégrer des briques cuites plates d'assez gros format qui serviront d'ancrage pour un mortier de rebouchage. Ces briques affleureront au parement de la paroi restaurée. Le mortier de rebouchage est un mortier de terre argilo-graveleuse, stabilisé à la chaux et au ciment, dont la proportion est établie en fonction d'un critère de « coloration », de manière à ce que le mur garde son aspect original. Si nécessaire on pourra ajouter un colorant.

Lors des journées de Madrid, Espagne (1989, *supra* référencé), déjà référencées), l'architecte **Ismael Guarner González** a exposé les systèmes de réparation qui ont été mis en œuvre pour restaurer la muraille en pisé de Niebla, Huelva, très érodée. Nous avons retenu le principe de mise en place d'un coffrage en bois en parement, d'une modulation de 2,50 m x 0,90 m, en partie calé par l'échafaudage (avec un chevron en appui à l'interface), et maintenu par des tirants de fil de fer torsadés fixés d'une part aux potelets extérieurs maintenant les banches, et à des fers à béton enfoncés profondément dans le mur ancien et repliés en leur extrémité apparente. La réalisation du pisé de réparation, en parement de la façade dégradée de la muraille, s'opère comme l'on ferait un pisé traditionnel, par damage en couches successives. On aura remarqué que la terre utilisée est stabilisée à la chaux et au ciment, dans des proportions qui varient et peuvent augmenter, selon la profondeur des cavités à restaurer. *Il conviendrait d'observer, alors que dix années se sont écoulées, si ce pisé stabilisé (bien démarqué du pisé original), n'a pas subi un comportement de résistance différentielle à l'érosion pluviale et à l'abrasion éolienne, au détriment du pisé original, non stabilisé. Le pisé stabilisé étant plus « dur » que le pisé original.*

A propos d'interventions de restitutions et de recompositions, **Ana Maria Hoyle**, (1998), à propos de Chan Chan, Trujillo, Pérou, note que durant la campagne de conservation et de mise en valeur de 1987-90, pour le mur frontal de la Plate-forme d'Enterrement de Tschudi, on a utilisé le pisé, conformément à la technique constructive originale. On a damé de la terre dans un coffrage en bois traditionnel. Une terre présentant une texture similaire au matériau archéologique : 24 % de terre argilo-limoneuse, 14 % de sable, 38 % de graviers et 26 % de pierres de taille moyenne. La texture rugueuse n'a pas été nettoyée de façon à bien la distinguer des matériaux d'origine.

III.10.4. - Réintégration des maçonneries en adobe

Comme on le notait en introduction de ce chapitre, la littérature ne rend pratiquement pas compte des techniques de réintégration de la maçonnerie en adobe, ou ne le fait qu'en des termes descriptifs généraux. Comme si cela allait « de soi » que de reboucher des trous et cavités présents dans des murs, ou de reconstruire un mur effondré, ou de stabiliser un mur en adobe très érodé en sa base. Ce n'est sans doute pas ce qu'il y a de plus compliqué à exécuter mais des dispositions d'étalement sont souvent nécessaire, comme des tâches de

préparation devant permettre de bien régler les aires de maçonnerie sur lesquelles on doit intervenir. De même, la question des briques d'adobe et du mortier qui seront utilisés avec deux options. L'une guidée par la volonté de garantir l'intégrité de l'intervention en respect de l'authenticité des matériaux originaux (forme, texture, couleur). L'autre guidée par la volonté de bien démarquer le nouveau de l'ancien, ou pour le moins de pouvoir les distinguer, tout en visant une relative intégrité de l'intervention.

Par exemple, **Ricardo Morales Gamarra** (1994), précise que sur la Huaca de La Luna, Trujillo, Pérou, le mur-support des reliefs avait perdu 80 % de son épaisseur à cause des escalades des visiteurs et du fait de l'érosion éolienne et pluviale. Il a donc fallu réintégrer le parement extérieur opposé au parement décoré, en utilisant des adobes originales et selon le modèle de pose ancien. Les têtes de mur ont été renforcées par l'ajout d'une assise d'adobe suivant le profil des murs. Ce matériau « sacrificiel » pourra être changé par la suite selon les effets résultant de son exposition.

III.10.5. - Réparation des fissures

Plusieurs contributions permettent de couvrir la question de la réparations des fissures structurales, dans les structures en bauge et dans les maçonneries en adobes.

• Réparation des fissures dans la bauge

Larry Keefe (1993, op. cit.), évoque le traitement des fissures dans les maçonneries de bauge. Du fait que la résistance en traction des murs en bauge est relativement faible, tout mouvement de la toiture ou du soubassement en maçonnerie génère des fissures. C'est le type de dommage le plus courant. Des fissures toute hauteur, s'élargissant vers le haut, confirment que le mur est poussé par la toiture. On ne peut réparer ces fissures que si l'on est sûr que tout mouvement a cessé. Les solutions de rebouchage des fissures au mortier de ciment qui ont pu être réalisées par le passé, accroissent le risque d'un dommage structural plus important par la suite. Une fissure qui dissocie deux pans de mur et les met en stabilité libre doit être réparée en rétablissant un lien structural et mécanique entre les deux pans séparés. Il est donc indiqué de réaliser cette liaison structurale avec des matériaux compatibles. On peut, par exemple, réaliser une chaîne de liaison avec des blocs de bauge moulés, appareillés et bâtis au mortier de terre. Si cela s'avère nécessaire, il est possible d'inclure des renforcements horizontaux en acier inoxydable, ou en bois imputrescible. Mais l'important, c'est de faire en sorte que les matériaux utilisés pour réaliser ces liens structuraux, aient le même comportement que le matériau du mur, notamment pour ce qui est de la perméabilité à la vapeur d'eau. Ces chaînes de liaison peuvent être placées à différentes hauteurs de la fissure et celle-ci, entre ces chaînes, est alors bouchée avec un mortier de sable et de chaux ou en remplissant de mortier de bauge (terre et paille), bourré et compacté. Il faut veiller à ce que la teneur en eau procure suffisamment d'ouvrabilité au mortier, et que le retrait soit minimal. Pour réparer les parties hautes des murs, on peut aussi creuser des réservations dans le matériau et les remplir ensuite avec une sorte de bauge stabilisée à la chaux mise en œuvre à l'état peu humide et compacté, comme un « pisé ». Mais cette technique n'est pas facilement utilisable pour des réparations d'angle par exemple.

• **Tuiles de bauge**

Toujours à l'occasion du colloque « *Out of Earth* » (1994), **Paul Bedford** a fait lui aussi part de son expérience dans la réparation de dommages structuraux sur les maisons en bauge du Devon. La problématique exposée concerne le rebouchage des fissures verticales, la liaison structurale entre la maçonnerie originale en bauge et la maçonnerie reconstruite, la liaison entre la bauge et la maçonnerie de réparation en « tuiles de bauge », le rebouchage des trous et cavités, avant de d'enduire à nouveau.

P. Bedford relève la nécessité de supprimer les enduits récents réalisés sur les maisons en bauge, généralement au ciment sur grillage, afin de rétablir un processus de « respiration » du bâtiment. Il remarque aussi que la réparation des dommages de structure, à l'aide de briques cuites ou de pierres, ne donne pas de résultats satisfaisants car il existera toujours un mauvais lien mécanique entre ces matériaux et la bauge et un risque de fissuration à leur interface. Le rebouchage des fissures avec de la bauge pose également des problèmes à cause du retrait au séchage. Devant ce constat, l'auteur évoque l'emploi de « tuiles » de bauge, produites comme l'on ferait des blocs de bauge mais qui sont plus faciles à utiliser du fait de leur petite épaisseur. Bedford évoque également d'autres techniques de renforcement des matériaux qui ont pu être expérimentées, comme l'armature à base de poils d'animaux, la fibre de verre résistante à l'alcali, les graines ou la paille de blé. La composition qu'il présente pour le mortier de bauge servant à produire les tuiles est la suivante : de la terre tamisée à 5 mm, du sable grossier, du mortier de chaux et une balle de paille de blé. Les quantités de chaque composant ne sont pas précisées. Le mélange de la terre et du sable avec le mortier de chaux s'opère à l'aide d'une bétonnière et la paille est rajoutée en dernière étape. Les tuiles sont moulées dans des formes en bois puis une fois démoulées, sont laissées à sécher pendant 3 à 5 semaines. Une fois la fissure préparée en réglant la découpe de ses bordures, des « coutures » (horizontales) à différentes hauteurs peuvent être réalisées avec cette maçonnerie de tuiles de bauge. Le mortier est un mélange de terre fine tamisée et de chaux. Ces tuiles de bauge peuvent être aussi utilisées pour assurer un bon lien mécanique entre la nouvelles maçonnerie de bauge et les murs d'origine.

Lors du prochain colloque « *Out of Earth II* » organisé par l'Université de Plymouth U.K. en 1995, **Gordon T. Pearson** présente des techniques de réparation des fissures dans les murs en bauge. Il propose deux types de solutions.

D'une part, l'élargissement de la fissure en réalisant une tranchée verticale, en parement extérieur, creusée en forme de queue d'aronde et rebouchée par du mortier de bauge à l'état peu humide, compacté comme du « pisé ».

D'autre part, la réalisation de coutures, disposées en quinconce, en parement extérieur et extérieur, à différents niveaux de hauteur de la fissure et en position alternée. Ces clés de couture sont réalisées avec des sortes d'agrafes en mortier de chaux armé, moulées sur place, et munies en chacune de leurs extrémités d'un petit retour en forme de crochet (« hooked ends »), qui sont intégrées en parement du mur après avoir préparé une réservation. Ces agrafes de chaux armée sont bâties au mortier de terre stabilisée. Elles peuvent être renforcées par une armature, plutôt en fibre tissée qu'en acier. Après avoir posé ces agrafes, la fissure peut être rebouchée à l'aide d'une barbotine de terre stabilisée à la chaux et à la paille.

• **Réparation des fissures dans les maçonneries en adobe**

A propos de la restauration de l'église « *Nuestra Señora de la Candelaria* », déjà référencée, **Arnaldo Juan Pujal** (1993, *ibid*), Argentine, évoque l'utilisation de clés en bois de section 10 x 15 cm pour la réparation de fissures, mises en place, à plusieurs niveaux de leur développement et de part et d'autre du mur, intégrées au nu du parement. La fissure est ensuite rebouchée au mortier de terre. Puis un grillage recouvre ces clés en bois de façon à se que le mortier de l'enduit puisse adhérer.

Nels Roselund (1990), rend compte de la réparation de murs en adobe fissurés sur le bâtiment dénommé « *Pio Pico* » (Gouverneur de Californie, 1850). Ce bâtiment est resté pratiquement sans entretien jusqu'en 1944, puis le tremblement de terre de Whittier Narrows l'a considérablement endommagé en générant de nombreuses fissures, notamment sur des murs qui n'avaient pas été renforcés lors de la campagne de restauration de 1944-48. L'élargissement moyen des fissures se situe entre 0,6 cm à 2.0 cm, avec un maximum de 2.5 cm. Un projet de stabilisation des murs fissurés a été engagé par le « *Californian Department of Parks and Recreation* ». Il était proposé d'injecter un matériau fluide dans les fissures, un matériau qui présenterait les propriétés de dureté, de résistance et de perméabilité, similaires à l'adobe. Ce matériau, bien sûr, ne devrait pas opérer de retrait après sa mise en place et bien adhérer aux adobes. Plusieurs échantillons de mortier, ajoutés d'ingrédients, ont été réalisés, principalement pour contrôler leur teneur en eau et leur fluidité. Les échantillons ont été ensuite observés quant à leur retrait, leur dureté, leur résistance à l'abrasion, et leur perméabilité. Au-delà de ces observations, quelques uns des échantillons présentant un intérêt ont été préparés en plus grande quantité pour être testés en injection. Les essais ont été effectués en appliquant sur les fissures un panneau de plastique acrylique transparent, de façon à observer le comportement du mortier lors de l'injection. Compte tenu de l'irrégularité de la surface du mur, les vides des bordures du panneau, (de 0 à 5 cm), étaient colmatés avec du papier journal humide. Après que le mortier ait opéré sa cure de séchage, l'échantillon a été observé quant à ses propriétés de dureté, de résistance à la rupture et à l'abrasion, et d'adhérence aux adobes. Le mortier a été injecté à l'aide d'une pompe exerçant une pression de 207 kPa.

Les résultats ont montré que les mortiers modifiés avec des quantités variables de ciment Portland, et/ou de cendres volantes et de chaux, présentent des caractéristiques améliorées par rapport aux mortiers de terre non modifiés. Les mortiers stabilisés au ciment Portland ont confirmé leur meilleure dureté et résistance ainsi que leur capacité à être moins sujets à l'abrasion que les adobes, et une bonne adhérence. Ceux stabilisés aux cendres volantes et à la chaux ont présenté des résistances et une dureté comparable à celles de l'adobe, mais sont plus exposés à l'abrasion, particulièrement pour les surfaces orientées à l'air durant la cure. Les mortiers de terre non modifiés présentaient un retrait important. Par contre, la perméabilité entre les deux qualités de mortier est restée comparable.

Nels Roselund confirme que les mortiers de terre modifiés par ajout de cendres volantes et de chaux présentent de bonnes qualités de fluidité, tout en assurant une rétention de l'eau par la chaux, que les cendres volantes apportent aux propriétés de lubrification, et que les réactions pouzzolanniques permettent de mieux contrôler le retrait. Leur résistance à l'abrasion peut être nettement améliorée par ajout de sable grossier. Les dosages proposés pour être injectés, en poids, ont été les suivantes :

- 60 parties de terre ;

- 20 parties de sable siliceux ;
- 18 parties de cendres volantes (type F) ;
- 2 parties de chaux (type S) ;
- de l'eau autant qu'il est nécessaire pour obtenir la bonne consistance.

A l'intersection de deux murs orthogonaux fissurés, des forages en mèches de fibres de verre, d'un diamètre de 5 cm, ont été réalisés, de manière à traverser les intersections de murs, pour être ensuite remplis de mortier injecté. Nels Roselund précise aussi l'ensemble des spécifications techniques qu'il convient de suivre pour préparer les mortiers, pour préparer l'injection, et toutes les étapes de la procédure de préparation des fissures et d'injection du mortier dans les fissures. De même pour les forages en mèches de fibre de verre.

Une contribution originale de **E. Crocker**, membre de « *Cornerstones Community Partnerships* », (1996), peu ordinaire et se démarquant de celle des autres auteurs ayant développé la question de la réparation des fissures, à propos de la restauration d'une petite église, celle de « *La Sagrada Familia* », à Pajarito, Nouveau Mexique, a retenu notre attention. Cet article est intitulé « la poussière retourne à la poussière » (« *dust to dust* ») et évoque l'utilisation d'ossements de bétail dans la réparation des adobes. L'auteur relève un degré avancé d'érosion du bâtiment, qui a dû être consolidé en bâtissant de nouvelles adobes appareillées avec les anciennes briques. Mais, selon le degré d'érosion des murs qui pouvait atteindre la moitié ou les deux tiers de leur épaisseur (en coupe), et lorsque les murs d'adobe présentaient des pans séparés en tenue libre, une autre solution fut adoptée. Elle a consisté à inclure des os d'animaux collectés dans les pâtures environnantes, dans un mortier de terre de consistance plastique. Au préalable, les parements des parois qui devaient être rebouchées ont été humidifiées abondamment, jusqu'à saturation, avec une eau de chaux (stabilisation à 3 % de chaux hydraulique). Le mortier de terre a été ensuite bourré avec force dans ces cavités, à la main, où il a très bien adhéré aux adobes humidifiées. Après avoir rempli ces cavités sur quelques centimètres d'épaisseur, les os d'animaux, qui avaient été préalablement plongés dans l'eau de chaux, ont été placés de façon à constituer des ponts entre les adobes protubérantes. Il faut pour cela utiliser les os qui sont les plus longs et les plus droits. Quand l'épaisseur de mortier est devenue plus importante ce sont des os plus épais et plats qui ont été insérés. Cette expérience fut étonnante car aucune fissure n'est apparue au séchage du mortier. Il y a sans doute des raisons techniques pour expliquer cela comme le relève E. Crocker, des raisons à la fois « mécaniques et chimiques ». La forme irrégulière des os insérés dans le mortier de terre a constitué un renforcement, comme des fers le feraient dans un béton armé. Mais dans les deux cas, la clé de la résistance réside dans la qualité des matériaux qui sont associés. L'ajout de chaux dans l'eau a sans doute eu un effet de liant ou de stabilisant, le carbonate de calcium réagissant avec une terre qui contenait environ 80 % de silice. Là où les murs saturés à l'eau de chaux ont été mis en contact avec le mortier, l'hydroxyde de calcium générant une re-carbonatation des deux matériaux (les adobes du mur et le mortier de remplissage), a contribué à éliminer l'interface entre ces matériaux anciens et nouveaux. Le haut niveau de phosphate de calcium contenu dans les os a contribué à générer un autre médium compatible favorisant la pénétration et l'effet liant de l'hydroxyde de calcium. Ainsi, l'ensemble de la réparation a présenté une matrice de carbonate de calcium uniforme, en séchant. L'auteur se demande si l'ajout de chaux à la terre aurait eu de l'effet, dans la mesure où les sols de la rive ouest du Rio Grande, dans la région de Pajarito, sont des sols calcaires avec un pH de 8.4 - 9. A proximité de l'église, les sols alluvionnaires de surface contiennent 5 à 10 % de carbonate de calcium, ce qui rend superflu l'ajout de chaux. La chaux rajoutée est de type dolomitique et elle a pu activer la réaction des composants

siliceux qui sont les plus importants dans ce type de sols. Par ailleurs, le carbonate de calcium peut être trouvé, sous forme de précipité secondaire, dans ces régions du Sud Ouest, où il est connu sous l'appellation de « caliche ». Il est possible, selon E. Crocker, que ce type de sol que l'on trouve à une profondeur de 50 à 60 cm, puisse être une ressource utile à la restauration des bâtiments anciens en terre. On a par ailleurs repéré la présence d'ossements saillants dans des vestiges d'établissements préhistoriques comme historiques. Y a-t-il là une voie de recherche à approfondir, au delà de cette expérience unique ?

III.11. - Réparation des dégâts sismiques.

III.11.1. – Chaînages, ancrages et autres interventions

Dans leur rapport de 1^{ère} année d'activités concernant les développements du projet GSAP, **Charles C. Thiel Jr., E. Leroy Tolles, Edna E. Kimbro, Frederick A. Webster et William S. Ginell**, exposent plusieurs concepts d'intervention de réhabilitation sismique rétroactive, tout en relevant les problèmes posés par la mise en œuvre, qui ont retenu notre attention. Ce propos prolonge celui qui a été présenté dans la partie précédente de cette revue de la littérature, sur les pathologies et le diagnostic, dans la mesure où les essais qui ont été réalisés dans le cadre du programme GSAP fournissaient les éléments de réponse pour définir des modes d'intervention.

• Réalisation de chaînages en béton

L'installation d'un chaînage en béton implique la découverte de la toiture et de la charpente, ainsi que la démolition des assises supérieures de blocs d'adobe, ou le creusement d'une réservation qui permettra de poser les barres d'acier et de couler le béton. Si dans le cours de cette opération on observe des éléments de bois qui sont très dégradés, soit par l'humidité, soit par les termites, ce sont là des éléments historiques qui risquent d'être irrémédiablement perdus. Leur remplacement par des matériaux similaires n'est pas ce qu'il y a de mieux. Peut-être vaut-il mieux, alors reconstruire un système qui n'est pas du tout historique et bien marquer la différence.

• Chaînages en bois ancrés

Evoquant la restauration et la réhabilitation d'une maison historique californienne, en 1985, la « Casa Primera », les auteurs rendent compte d'un principe de chaînage réalisé en éléments de contreplaqué, ancrés dans le mur d'adobe grâce à des ancrages « adhésifs » de type *Hilti*, et également fixé au plancher existant en sous-toiture, grâce à des clés en fer plat, elles-mêmes fixées dans le contreplaqué et le plancher.

• Ancrages en fibre de verre

Evoquant un autre projet de réhabilitation rétroactive, celui de « Pio Pico Mansion », les auteurs rendent compte de l'utilisation d'ancrages en fibre de verre, pour solidariser à nouveau les murs, aux angles (pignons et gouttereaux extérieurs), et aux intersections de murs porteurs (refend et gouttereaux extérieurs). Ces ancrages sont installés avec un angle d'inclinaison de 45 ° depuis le haut du mur et en direction des fondations du mur à relier. Les forages

ont été effectués avec une perceuse sans percussion. Le mortier de scellement de ces ancrages en fibre de verre a la même composition que celui servant à reboucher les fissures, soit un mélange de terre, pouzzolane et ciment.

• *Un exemple d'intervention*

Par ailleurs, à propos de mesures de réhabilitation rétroactive de bâtiments affectés par les séismes, **Mel Green** (1995), évoque les types d'interventions qui seront réalisés sur la Mission San Gabriel (Californie), après le tremblement de terre de Northridge, en 1994.

Les principaux travaux de réparation et de mitigation prévus sont :

- l'installation d'un chaînage ;
- la réparation des murs en adobe fissurés ;
- l'enlèvement de l'enduit au ciment ;
- la suppression de la base en ciment et des boiseries ;
- la réparation de l'ancrage de la structure de toiture ;
- la suppression d'un appentis.

Pour le chaînage, Mel Green observe qu'il sera fait avec deux matériaux, suivant la situation des travaux. D'une part avec un renforcement structural en acier, dans la partie attique et sur la plupart des murs extérieurs, sauf dans les endroits où cette solution n'est pas envisageable et où elle sera remplacée par un chaînage en plaques de contreplaqué. Le but de ce chaînage est de contrôler la déflexion extérieure du mur. Mais, l'expérience montre qu'un chaînage trop rigide a tendance à se désolidariser des murs, alors qu'un chaînage trop flexible ne peut maintenir le mur hors de son plan. Ainsi, les chaînages mis en œuvre doivent correspondre à la rigidité du mur, pour pouvoir bouger avec eux et contrôler leur mouvement vers l'extérieur. Le mur est relié au chaînage par des boulons d'ancrage.

Pour la réparation des murs, dont plusieurs parties montrent un déplacement latéral des blocs d'adobe et un risque d'effondrement, l'approche de réhabilitation consiste à remettre les blocs dans leur position originale et à les rejointoyer au mortier de terre. D'autres blocs peuvent être mis en place et maintenus par des aiguilles en acier inoxydables qui seront ensuite invisibles car recouvertes par le nouvel enduit de terre.

L'enduit au ciment piégeant l'humidité dans les murs doit être totalement enlevé, car il y a un risque d'affaiblissement substantiel des murs dans l'éventualité d'un autre séisme. Après avoir enlevé cet enduit, les murs devront sécher puis seront de nouveau enduits avec un mortier d'adobe. Cela pourra exiger un entretien périodique.

Les bases en ciment qui devaient protéger les murs de l'humidité ont eu un effet contraire en déplaçant vers le haut du mur la zone d'évaporation. En plus, cela empêche les fondations et le soubassement de respirer et d'évaporer leur humidité piégée dans le mortier des pierres, derrière cette protection en ciment. Sa suppression rendra le soubassement en pierre apparent et contribuera à un meilleur contrôle des remontées capillaires.

La structure du toit en chevrons sera liée aux ancrages des chaînages et la couverture détériorée, comme les bardages des pignons en shingles (partie haute), seront réparés.

III.11.2. – Autres techniques de réhabilitation sismique

Fred Webster et John D. Guinn, (1990), ont fait une évaluation de l'évolution des techniques de réhabilitation sismique rétroactive, utilisées sur le patrimoine architectural en adobe de Californie, sur les 18 années précédant leur présentation. Ils montrent qu'au cours des 8 à 10 dernières années, il est apparu avec évidence que certains attributs structuraux sont critiques pour la sauvegarde des édifices historiques en adobe. Ces principaux attributs sont :

- les liens verticaux flexibles ou les chaînages ;
- l'ancrage des chaînages au sommet des murs ;
- les rapports d'élancement des murs (hauteur/épaisseur) ;
- le maintien en place des matériaux du mur durant les secousses.

La publication en 1985, pour la Californie, du « *State Historic Building Code* », (SHBC), marque un tournant dans l'évolution des techniques de réhabilitation sismique rétroactive, par rapport au précédent « *Uniform Building Code* » qui ne couvrait pas la question des structures en terre et qui préconisait l'introduction de systèmes structuraux indépendants en béton et en acier. Le SHBC reconnaît explicitement la résistance « inhérente » des matériaux anciens et permet :

- de prendre en compte l'évidence historique dans tout jugement d'ingénierie ;
- de considérer le rapport d'élancement des murs dans un rapport situé entre 5 et 6, au lieu de réaliser une analyse structurale plus complète ;
- de considérer une valeur maximale de résistance au cisaillement de l'adobe fixée à 4 psi ;
- d'inclure un chaînage renforcé à une profondeur minimum de 15 cm pour lier les murs du second niveau et au niveau de la toiture.

L'apport des recherches au cours des années 80 a été aussi décisif. Les auteurs référencent les recherches effectuées sur des modèles en adobe, exposés à des secousses simulées sur table vibrante, de façon à tester leur performance sismiques, à l'Université de Stanford et de Berkeley. Mais également les essais faits par l'Université Catholique de Lima et l'Université Nationale de Mexico. Les conclusions clés de ces recherches sont les suivantes :

- la réponse post-élastique et le potentiel d'effondrement des bâtiments en terre sont tributaires de l'ampleur des déplacements des secousses du terrain ;
- la résistance à l'effondrement est grandement améliorée par la prise de mesures structurales permettant de maintenir les éléments de construction entre eux, après que les fissures soient apparues ;
- les chaînages jouent un rôle majeur pour convertir les forces d'inertie hors du plan du mur, en forces dans le plan du mur et parallèles aux secousses du terrain ;
- la flexibilité verticale du chaînage et de son ancrage sur le sommet des murs permet au chaînage de se mouvoir en même temps que les murs endommagés bougent ;
- l'ajout d'un grillage sur la surface des murs améliore considérablement la ductilité de la structure exposée à des secousses répétées et pour des déplacements maximum de la table vibrante.

Les auteurs exposent ensuite les techniques qui ont prévalu dans le projet de réhabilitation sismique rétroactive de la « *Court House Adobe* », située à Shafter, Californie. Ce projet a directement bénéficié des enseignements des recherches réalisées au cours des précédentes années, mais aussi de l'évaluation de projets de réhabilitation antérieurs, et de l'observation du comportement des édifices en adobe endommagés par les séismes. Au-delà de l'évocation de l'histoire du bâtiment qui a été affecté par les séismes de Kern

County et Bakersfield, en 1952, et de sa description architecturale, les auteurs précisent ensuite les techniques adoptées qui se résument à trois types de mesures :

- le rétablissement de la continuité des chaînages là où elle n'existait pas ;
- l'ancrage des chaînages aux murs ;
- l'utilisation de grillage pour contenir la structure.

Ainsi, ce bilan de l'évolution des techniques de réhabilitation rétroactive des édifices en adobe de Californie, montre bien qu'un grand tournant a été pris après 1985 grâce à la publication du SHBC. Ce sont désormais des techniques ayant moins d'ingérence et plus indépendantes qui sont utilisées, plus interactives, jouant davantage sur la stabilité des structures et la liaison des murs par des chaînages ancrés.

Cette évaluation proposée en 1990 sera suivie par les développements du « *Getty Seismic Adobe Project* », (GSAP), que l'on a eu l'occasion de présenter, en amont, dans la partie « diagnostic ». Les résultats de ce projet qui prolonge les recherches antérieures des Universités de Stanford, Berkeley et Lima, seront d'un apport considérable pour confirmer les nouvelles orientations à donner aux techniques de réhabilitation sismique rétroactive, en privilégiant davantage la stabilité des structures, plutôt que leur renforcement.

III.12. - Conservation des enduits : pratiques traditionnelles et produits « naturels »

La question de la protection des surfaces murales des architectures de terre est essentielle, même si l'application dans les faits des cultures constructives du fameux dicton « tout ce dont les maisons en terre ont besoin, ce sont de bonnes bottes et un bon chapeau », prouve que des murs en terre non enduits, mais bien protégés, et sans doute entretenus, peuvent résister sans subir de graves dommages pendant très longtemps. Mais, au delà du rôle d'une intégrité efficace de la protection de nature architecturale, dont certains ont pu dire qu'elle est le meilleur « stabilisant », la question se pose différemment lorsqu'il s'agit de protéger des murs ruinés, dépourvus de « bottes et de chapeau », du fait de la rupture de l'équilibre de cette protection architecturale qui n'est plus assurée. Ainsi, beaucoup d'interventions visent à pallier cette absence de la protection architecturale par la réalisation de « capping » sur les sommets des murs exposés et par la réalisation d'enduits sur leurs parements. Paradoxalement, même si l'on considère toute l'importance des savoir-faire de protection traditionnels, ceux-ci, dans les faits, sont peu réhabilités. Le fait est que ces pratiques ne sont viables que si elles sont associées à un entretien qui oblige à des réfections périodiques. Or, de nos jours, là encore, même si l'on considère la pertinence des pratiques d'entretien, « l'entretien », celles-ci n'ont pas assez « bonne presse ». Car l'entretien est une charge de travail mobilisant des équipes permanentes qui coûtent de l'argent. Pour beaucoup de décideurs ou de gestionnaires de sites chargés de leur conservation et de leur mise en valeur, ces coûts d'entretien doivent être réduits autant que possible. Certains ont pu même imaginer que l'on pourrait se passer d'entretien. C'est hélas impossible et a fortiori pour des architectures de terre qui ne sont parvenues jusqu'à nous que parce qu'elles étaient entretenues avec des techniques et des matériaux compatibles. Ainsi, les nouvelles orientations de la recherche de ces dernières années ont considérablement développé les solutions de protection de surface en forme de consolidation chimique. Les résultats, comme on va le voir, sont très variés, bien que parfois intéressants et même prometteurs. Mais,

les paramètres à maîtriser sont tellement nombreux (cf. G. Chiari, 1990), que les résultats, s'ils sont parfois surprenants d'efficacité, restent encore très aléatoires. Les perspectives sont donc tournées vers la réduction de cette part d'aléatoire en mieux maîtrisant les propriétés et les caractéristiques des matériaux à protéger ainsi que les facteurs d'environnement physique, climatique et socioculturel. Au terme de près de 30 années d'expérimentation en matière de consolidation chimique, une nouvelle orientation se dessine, à la confluence des savoir-faire traditionnels et de l'utilisation de procédés actuels de consolidation en visant à « améliorer » les matériaux et les pratiques traditionnelles. Mais, pour l'instant, cette orientation témoigne aussi de quelques contradictions qui peuvent la rendre « suspecte ». Dès lors, malgré les contradictions supra soulevées, les opérateurs semblent redonner du crédit aux matériaux et aux pratiques traditionnelles, en intégrant mieux le facteur entretien. Serait-ce là aussi une ouverture vers l'intégration du concept de « développement durable » dans les faits de la conservation architecturale ? En tout cas, les propos qui vont suivre montrent bien qu'il n'y a certainement pas de « recette » universellement applicable, comme le disaient K. Dowdy et M.R. Taylor à propos du « backfilling » (1993, op. cit.), et que l'avenir des pratiques conservatoires ne se définit pas en termes de positions « dures » ou « radicales » mais plutôt en termes d'interrelations, de « flexibilité » (souplesse, adaptation et peut-être même « douceur ») et surtout, de « compatibilité ».

La question de la conservation des enduits protégeant les architectures de terre a été plus directement abordée, comme un champ d'investigation spécifique, à partir des années 90. Ce champ inclut aussi celui de la conservation des surfaces décorées, peintures et bas-reliefs qui font l'objet d'interventions très élaborées que ne peuvent mener à bien que des spécialistes. De la conservation mobilisant des savoir-faire traditionnels, et des produits « naturels », à la consolidation à l'aide de produits chimiques, la distance est grande. Compte tenu des développements assez spectaculaires de la consolidation à base de produits chimiques, il nous a semblé opportun de traiter la question en un chapitre propre qui suivra celui-ci. Mais tout d'abord, quelques rappels fondamentaux.

III.12.1. - L'obligation de « respiration » des murs en terre

Dans un document rédigé pour le compte de la « Société pour la Protection des Bâtiments Anciens » (SPAB) de Londres, **Philip Hughes** (1986), développe la problématique de la « respiration des murs ». Le propos est très généraliste mais mérite une attention car il restitue des « vérités » incontournables. Ph. Hughes rappelle que si les bâtiments modernes sont le plus souvent revêtus d'enduits « imperméables », les bâtiments anciens construits avant la moitié du XIX^{ème} siècle étaient conçus pour « respirer » et pour permettre une évaporation de l'humidité piégée dans leurs murs. Les matériaux utilisés étaient des matériaux absorbants (pierre, briques, bois, bauge, torchis). Les mortiers étaient le plus couramment des mortiers de sable-chaux ou de terre stabilisée à la chaux. Leur porosité permettait l'évaporation de l'humidité, et plus facilement par les joints que par les matériaux du mur eux-mêmes. Les enduits extérieurs étaient à base de chaux, et de texture ouverte, pour mieux respirer. Les décorations intérieures étaient le plus souvent exécutées avec des badigeons à la chaux qui pouvaient être colorés avec des pigments naturels. Une décoration qui respire, également. Le débat est bien posé : repousser l'humidité (bâtiments modernes) ou évaporer l'humidité (bâtiments anciens) ?

Considérant la plupart des traitements récents qui ont pu être réalisés sur des bâtiments anciens, on peut observer qu'ils génèrent beaucoup de problèmes à

cause de l'emploi de matériaux imperméables. Ceux-ci constituent des barrières contre l'humidité qu'ils bloquent. Et plus l'humidité à l'intérieur des murs est piégée, plus le processus de dégradation est accentué. C'est le cas par exemple, avec l'emploi de peintures extérieures conçues pour prévenir contre la pénétration de l'humidité. C'est le cas des enduits extérieurs au ciment, souvent surdosés, qui ont le même effet que les peintures imperméabilisantes, avec un résultat parfois encore plus dramatique. C'est encore le cas des reprise de joints des maçonnerie au mortier de ciment, qui ne peuvent plus jouer leur rôle de matériau évaporant. Un mortier de jointoiement doit être davantage considéré comme « sacrificiel » car il est moins coûteux et plus facile de refaire périodiquement des joints dégradés que de remplacer des pierres ou des briques. Lorsque les murs extérieurs ont été enduits au ciment et que les enduits intérieurs sont toujours les enduits originaux à la chaux, le processus d'évaporation de l'humidité est renversé et entraîne une dégradation accrue des surfaces intérieures. De plus, cette humidité qui suinte des murs intérieurs a des répercussions sur l'ambiance thermique de l'habitat et sur les dépenses en chauffage. Si l'on enduit et l'intérieur et l'extérieur avec des enduits étanches, l'humidité du mur va s'élever avec une augmentation de la concentration des sels dont l'expansion va générer des éclatements, des ventres localisés et affaiblir la stabilité des murs, progressivement.

Ainsi, comme le relève Ph. Hughes, les bâtiments anciens se comportent bien si on leur permet de fonctionner tel que les bâtisseurs anciens le prévoyaient. Les mortiers, les enduits et les revêtements de finition, comme les décorations, doivent être relativement perméables pour permettre le transfert et l'évaporation de l'humidité. Il est préférable de supprimer les traitements imperméabilisants qui auraient pu être réalisés sur des bâtiments anciens mais en prenant de grandes précautions selon l'ampleur des problèmes observés et des dégâts occasionnés. Car ces opérations peuvent aussi contribuer à dégrader les murs-supports. Il faudra ensuite favoriser un assèchement des murs et une bonne ventilation. Cela peut prendre du temps, voire plusieurs années si les murs sont saturés d'humidité. Durant ce processus de séchage, les dépôts de sels sont activés et peuvent causer de graves dégradations aux murs.

III.12.2. - Enduits traditionnels

La littérature révisée fait peu cas des pratiques traditionnelles d'enduit sur les maisons en terre et il y aurait sans doute matière à développer une recherche plus spécifique et approfondie. Pour une approche de caractère généraliste et introductive, on pourra se reporter à H. Houben et H. Guillaud (1989), déjà référencés dans notre chapitre I, qui décrivent l'éventail connu des pratiques d'enduits et repèrent les différents matériaux et produits « naturels » utilisés dans différents contextes géographiques et culturels. D'autres publications récentes (1996, 97), préparées par CRATerre, en association avec ITDG (U.K.), ont également permis d'aborder cette question des mortiers de construction et d'enduit, qui peuvent compléter l'approche supra citée. Dans cette révision, nous avons repéré quelques rares compte rendus de pratiques et d'intervention sur le patrimoine architectural dans le sud-ouest des U.S.A. (Nouveau Mexique).

E. Crocker (1992), évoque la composition des enduits traditionnels en terre et paille, à Taos Pueblo, et leur mode d'application, observés sur place alors que l'entretien de ces enduits est réalisé par des femmes du pueblo. Il note que la paille ajoutée à la terre locale est coupée en brins très courts, d'environ 5 cm. L'application de cet enduit se fait à la main, avec la paume, dans un mouvement en forme d'arc, le bras étant lancé au-delà du corps. Ce mouvement permet

alors aux brins de paille de prendre une position proche de l'horizontale. Il apparaît alors à l'observation que ces brins de paille servent non seulement à contrôler le retrait du mortier au séchage mais aussi, à diviser le ruissellement de l'eau de surface, à ralentir le flot, et donc à réduire l'érosion du mur. Cela n'est pas sans rappeler les pratiques de l'enduit « *makuba* », au pays Haoussa du nord du Nigéria, comparables à celles précédemment citées du « *dawadawa* », au Ghana, et réalisées de la même manière.

Alors directeur technique du programme « *Churches : Symbols of Community* », développé par la « *New Mexico Community Foundation* », le même E. Crocker (1993), rapporte les procédés de restauration des enduits sur le patrimoine des petites églises et chapelles d'époque post-coloniale du Nouveau Mexique, USA. Ces édifices ont notamment été considérablement altérés par la réalisation d'enduits au ciment Portland et le programme a réhabilité l'emploi de la chaux et de la terre stabilisée à la chaux. Après restauration des murs en adobe et nettoyage des parements, de façon à extraire tout matériau non adhérent, les murs ont été arrosés plusieurs fois avec de l'eau de chaux (une solution à 3 %), puis recouverts de deux couches d'enduit de terre mélangée avec cette même eau de chaux. Finalement la finition a consisté en un badigeon de lait de chaux en solution de 5 à 8 % de chaux en suspension dans l'eau. Des enduits de finition, en deux couches, ont consisté en une première couche grossière de 3, 5 mm en sable-chaux (dosage 1:5), arrosée au lait de chaux après sa prise. Puis en une deuxième couche de sable-chaux (dosage 1:3), de 7 mm, également arrosée d'eau de chaux à 1-3 %, de temps en temps, durant les 3 à 4 semaines de cure qui ont suivi. Le « monitoring » de cette expérimentation a montré des problèmes d'adhérence de parties de ces enduits qui semblent résulter de difficultés à contrôler la cure de séchage, notamment par des climats de forte chaleur. L'expérience confirme également que l'on a intérêt à préparer les mélanges de mortier plus longtemps à l'avance sans doute pour obtenir une meilleure homogénéité et une meilleure ouvrabilité, ce qui confirme les pratiques traditionnelles encore observables dans plusieurs pays (Afrique du Nord, notamment).

Notons également que plusieurs programmes de conservation ou de restauration du patrimoine architectural en terre, entrepris dans les pays du Maghreb (Maroc, Algérie et Tunisie), mais également dans les pays du Moyen-Orient (Yémen, Emirats arabes et Sultanat d'Oman), ont largement contribué à réhabiliter les pratiques traditionnelles d'enduits à base de terre, terre et paille, terre stabilisée à la chaux hydraulique naturelle et badigeons à la chaux. Ces programmes ont certainement du donner lieu à une production documentaire qu'il conviendrait de mieux rassembler pour le bénéfice de la plus large communauté des conservateurs de l'architecture de terre. Des expérimentations associées à un « monitoring », visant à réhabiliter les techniques d'enduits traditionnels à base de terre et paille, ou à base de « juss » ou de « sarooj » (plâtres et chaux traditionnels), ou de terre stabilisée avec ces matériaux, engagées sur le site de Bahla, au Sultanat d'Oman, par les architectes marocains M. Allaoui et T. Ouzgane (1993-99 et en cours) mériteraient sans doute d'être mieux connues. Il conviendrait, d'une manière générale, d'encourager plus systématiquement les opérateurs de terrain à publier leurs travaux.

• **Enduits aux mortiers bâtards, badigeons, peintures et imprégnations**

Michel Dayre et Emmanuel Kenmogné, (1993), ont présenté une évaluation sur le comportement de différents systèmes de protection de surface des constructions en terre, lors de la conférence Terra'93, Silves, Portugal. Ils rendaient compte des résultats, sur une période de 5 ans (4 hivers), d'un programme d'essais sur des murets-tests protégés par diverses solutions de protection de surface, exposés aux rudesses du climat de Grenoble, France (hivers froids, étés chauds, vents dominants du nord-ouest), dans l'enceinte du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, (CSTB), situé à Saint-Martin-d'Hères (périphérie de Grenoble).

Le programme a porté sur un ensemble de 106 murets construits en blocs de terre vibro-compactée ou hypercompactée, stabilisée au ciment (5 %) ou non stabilisés (blocs utilisés dans la construction du « Domaine de la Terre » de l'Isle d'Abeau), en adobe ou en pisé d'agréats compactés, ou en pisé de terre ajoutée de paille.

Tous ces murets ont été construits à base de terre régionale dont la minéralogie décrit en proportions variables la présence de kaolinite et de chlorite/smectite (de 2,5 % à 9 %) et d'illite (de 5 % à 8 %), sans jamais dépasser 10 % d'argile. Certaines terres qui manquaient d'argile ont été mélangées à d'autres, plus riches en minéraux argileux.

Les systèmes de protection de surface qui ont été testés (et qui le sont toujours car le programme fait l'objet d'un « monitoring » annuel), sont les suivants :

- des enduits au mortier bâtard (sable-chaux-ciment / ou sable-chaux) ;
- des badigeons de chaux ou de ciment ;
- des peintures acryliques, vinyliques ou glycérophtaliques ;
- des imprégnations aux silicates alcalins et aux siliconates ;
- des imprégnations à l'éthyle silicate .

Exposant les résultats, Michel Dayre et Emmanuel Kenmogné relèvent les principaux types de désordres suivants :

- un décollement qui concerne « tous » les systèmes de protection, plus ou moins accusé, selon les supports, les traitements et les orientations ;
- un lessivage et une érosion, principalement dus au ruissellement de la pluie. Ces désordres sont plus accusés pour les enduits minces ;
- un farinage qui affecte particulièrement certains badigeons et peintures, sous forme de pulvérulence très exposée à l'érosion ;
- un faïençage sous forme de microfissures, qui affecte plus particulièrement des badigeons au ciment et les enduits surdosés en liants hydrauliques (ciment ou chaux) ;
- un écaillage sur les peintures filmogènes qui se détachent en lambeaux ;
- une fissuration des mortiers et des imprégnations, notamment aux arêtes vives des murets.

En comparant ces résultats obtenus après 5 ans d'exposition, les auteurs relèvent que :

- les peintures, de quelque type qu'elles soient, sont affectées par la fissuration, l'écaillage et le décollement, sur 80 % de la surface totale de 16 murets sur les 22 murets traités aux peintures ;
- les badigeons sont affectés par le faïençage, l'écaillage et le décollement. Mais les badigeons à la chaux qui sont affectés par un farinage ne montrent pas

de décollement ni de faïençage. Les badigeons au ciment se décollent sur 60 % de la surface des 17 murets traités ;

- les mortiers bâtard sont bien conservés, seulement 4 murets sur 38 sont fissurés aux arêtes ;
- les imprégnations aux silicates alcalins et aux siliconates sont lessivés et érodés sur moins de 40 % de la surface des 22 murets traités ;
- les imprégnations à l'éthyle silicate (réalisées en automne et en hiver 1989), sur deux murets en adobe, et sur une moitié de leurs faces pour garder une partie témoin, montrent une évolution marquée car les murets n'ont pas été couverts. Les parties hautes se décollent et exposent le muret à des infiltrations. Mais, les auteurs observent que la différence de période de traitement ne semble pas affecter l'efficacité du procédé alors que l'on aurait pu penser que le processus de polymérisation pût être inhibé par le froid.

Enfin, pour tous les murets traités, quel que soit le système de protection de surface adopté, l'orientation joue un rôle important. Les parements exposés à l'est et au soleil levant, sont plus dégradés, vraisemblablement du fait de l'alternance journalière de gel-dégel en hiver ou lors de températures proches du degré zéro.

Dans leur conclusion, M. Dayre et E. Kenmogné relèvent que :

- « les enduits pelliculaires fins ne peuvent prétendre, sans réfection, à une durabilité de plusieurs années ;
- les mortiers bâtards (...) bien que sujets à une fissuration aux arêtes offrent une meilleure durabilité ;
- les imprégnations (...), sous réserve d'une bonne protection contre les infiltrations (...) offrent des possibilités intéressantes, du même ordre que les mortiers. »

Mais, « le choix d'un système de protection devra être fait en tenant compte des données économiques et notamment de l'optimisation des cycles de réfection ». Nous sommes bien à la clé du problème que ne manquent pas de rappeler la plupart des chercheurs ayant travaillé sur cette question de la protection de surface des constructions en terre : la maîtrise d'une équation simple entre deux paramètres fondamentaux : le coût des systèmes de protection et leur entretien.

III.12.3. - L'utilisation de produits « naturels »

Le registre des savoir-faire traditionnels valorisant l'emploi de stabilisants « naturels », est très large. On a déjà évoqué le jus de néré. La réhabilitation de ces procédés retient de plus en plus l'attention des conservateurs dans la mesure où l'entretien périodique peut être envisagé, organisé et garanti. Nous ne ferons pas ici le point sur cette trop vaste question qui devrait aussi faire l'objet d'une recherche plus spécifique certainement d'une grande utilité. La conservation de la mémoire des savoir-faire, notamment sur la question de la protection des surfaces en terre, est largement relevée comme essentielle, par de nombreux chercheurs et opérateurs du terrain. Nous nous attacherons ici à présenter quelques rares contributions relatives à la recherche ou à la réhabilitation de l'emploi de produits naturels dans le cadre de projets de conservation repérés lors de cette révision de la littérature.

Dans un rapport de séminaire de « réflexion sur la situation des musées en république populaire du Bénin », couvrant la question du « patrimoine architectural traditionnel » et de la « politique de conservation », on aura relevé un propos de l'architecte béninois **Jacques Gbénou** (1984), évoquant des procédés de consolidation des enduits de terre basés sur l'emploi de produits

naturels comme l'huile de kapokier et l'acide palmitique. L'huile de kapokier est produite à partir d'une torréfaction des graines et leur réduction en poudre, de façon à préparer une bouillie résultant du mélange de 25 litres d'eau et de 10 kg de poudre. Ce mélange est ensuite bouilli pendant 6 heures puis laissé à décanter pendant 12 heures. L'huile qui est issue de cette décantation est chauffée à une température de 86-88 ° C., puis l'on prépare le mélange suivant : 1 partie de terre, 8 partie de sable ajoutés de 2 % du poids total de la terre et du sable en huile de kapokier. Le mur de terre est alors badigeonné avec ce mortier en ajoutant encore de l'huile pour 1 % de son poids.

Jacques Gnébou évoque également un traitement des murs à base d'acide palmitique. Ce produit provient de la réaction chimique de l'acide chlorhydrique sur une solution de savon « *Akoto* ». Selon l'auteur, « une dissolution du savon « *Akoto* » dans l'eau est précipitée après 48 heures par de l'acide chlorhydrique dilué à 25 %. On obtient alors de l'acide palmitique. » Cet acide est « liquéfié par chauffage et mélangé à de la chaux par agitation. Le mélange ainsi obtenu est appelé palmitate de calcium. 10 % en poids de ce palmitate de calcium est alors intégré au mélange de terre-sable défini précédemment pour obtenir un enduit. » Jacques Gnébou précise que « cet enduit résiste aisément au test par arrosage violent à 2 kg/cm². »

• **Stabilisant naturel : le « *mucilago de tuna* »**

En 1990, à l'occasion de la Conférence « Adobe'90 », **Ana Maria Hoyle** proposait une évaluation de ce traitement au « *mucilago de tuna* », au-delà de trois années d'intervention. Cette évaluation lui semblait néanmoins prématurée mais elle était en mesure d'informer sur les résultats du traitement et de son fonctionnement en conditions climatiques normales. Elle confirmait la compatibilité du *mucilago* avec les adobes de Chan Chan en indiquant que ce consolidant naturel ne formait pas de pellicule imperméable et qu'il contribue à améliorer la cohésion et la résistance des matériaux. En outre, il est tout à fait possible de traiter à nouveau les zones préalablement traitées, comme on peut le faire avec d'autres consolidants. Ces qualités du produit lui apparaissaient favorables mais les propriétés de cohésion disparaissent avec le temps (non connu), obligeant à répéter le traitement. Des tests sur la résistance du consolidant, réalisés en laboratoire avec des dosages à 5 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % et 50 %, pour diverses techniques d'application sur des adobes salines en immersion dans l'eau, montraient qu'avec l'augmentation du pourcentage de *mucilago*, la densité de la solution et la résistance de la surface, augmentent. Mais l'absorption du produit (en moyenne sur 3 cm), est plus lente. Il se produit également une altération de la couleur originale. Par ailleurs, ces éprouvettes ont également toléré la pénétration d'éthyle silicate 40 sans affecter la porosité car il a été possible d'extraire les sels. Il semblerait, d'après A.M. Hoyle, que les deux consolidants pourraient être utilisés en traitement complémentaire. Mais cette hypothèse devait encore faire l'objet d'autres observations pour être corroborée ou infirmée. En 1998, dans son mémoire bilan Ana Maria Hoyle déclare que l'expérience montre que ce traitement au *mucilago* présente une durabilité assez courte et oblige à répéter son application deux fois par an.

Par la suite, proposant un « Mémoire sur le plan de gestion de Chan Chan », Pérou, la même **Ana Maria Hoyle** (1998), évoque le retour à l'utilisation de produits naturels pour consolider les surfaces en terre de certaines parties du site, après un période d'expérimentation intensive sur la consolidation à partir de produits chimiques. Rappelons les différentes étapes de cette évolution.

En 1974, après une longue période de travail de nettoyage intensif et de restauration de grandes zones du Palais Von Tschudi, visant à restituer l'état original de nombreuses structures (Place cérémonielle, « *Sala de las 24 Hornacinas* », quartier des Audiences, *Huachaque*, « *Huaca Esmeralda* », « *Huaca Arco Iris* », frises aux poissons et oiseaux), travaux menés simultanément avec des recherches archéologiques, des actions visant à tester des produits de consolidation chimique ont été engagées, sous la responsabilité du restaurateur mexicain Rodolfo Vallín. Plusieurs produits ont été testés comme le *Curasol* (Acétate de polyvinyle en dispersion), dosé à 5 %, 10 % et 12 % en solution aqueuse. Les essais à 5 % de *Curasol* ont montré une assez forte résistance à la pénétration, associée à un changement de couleur et à la génération d'un aspect brillant. D'autres tests ont été réalisés avec des résines synthétiques : du *Primal AC* à 3 % et 4 % dans de l'eau distillée, appliqué après nettoyage de la surface. Les résultats, intéressants quant à l'amélioration de la résistance à l'érosion, ont également confirmé un changement de couleur. Puis du *Mowilith DMH* (Acétate de Polyvinyle en émulsion), à 4 % dans de l'eau et appliqué en 2 couches. On n'observa pas de changement de couleur et une bonne résistance. Puis du *Paraloïd B-72* (solution acrylique), dilué dans 4 % de *Xilol*, appliqué en 2 couches et en protégeant la surface traitée par un polyéthylène, de façon à ralentir l'évaporation et favoriser une absorption plus lente. Celle-ci n'a pas offert de résistance et la couleur n'a pas changé. Puis, du *Bedcryle*, (solution de méthacrylate), à 4 % dans du *Xilol*, appliqué de la même façon que le produit précédent mais qui a donné un changement notoire de coloration. Finalement, les expériences de Rodolfo Vallín, ont conclu sur l'intérêt d'utiliser le *Paraloïd B-72*.

En 1975, G. Chiari a expérimenté l'éthyle silicate dilué dans de l'alcool, et dosé à 96,4 %, sur deux sections de murs de 1 m², sur les reliefs d'oiseaux situés près des accès est et ouest du patio nord-est. D'autres essais ont été également réalisés sur la « *Huaca Arco Iris* ». Le produit a contribué à intensifier la couleur mais s'est aussi dilué au cours du temps.

En 1977, beaucoup d'autres expériences de consolidation chimique ont été entreprises sur les enduits et reliefs décorés, sous la responsabilité de R. Morales Gamarra. D'autres tests ont été réalisés avec du *Primal AC-33* (émulsion acrylique), avec du *Mowilith DMA 1H* (acétate de polyvinyle), du *Paraloïd B - 72* (copolymère acrylique), du *Bedacryle 122-X* (méthacrylate), du *Calato CB* (nylon soluble). Plus tard, en 1983, R. Morales Gamarra observa que ces tests n'étaient pas positifs car au-delà de 2 années, les zones traitées commencèrent à s'exfolier sous l'effet de l'humidité piégée et du fait d'une orientation vers l'océan. De plus, la pellicule plastique gênait de futurs traitements. Par contre, du côté intérieur plus protégé, l'application des produits pour fixer des parties de mur dégradé, n'a pas révélé les mêmes problèmes, sans exfoliation, et ont même donné de bons résultats. Sur l'ensemble des essais, R. Morales a recommandé l'emploi du *Mowilith DMA-1H* ou du *Primal AC-33*, dilué à 3 ou 5 % dans de l'eau. Le premier produit a été appliqué sur les structures du Quartier des Audiences, pour consolider les reliefs, les poches et les creux ayant été remplis par un mélange humide de terre et de sable (1 : 2) stabilisé à la chaux à 10 %. Pour le traitement des enduits et des reliefs situés du côté extérieur, toujours dans le Quartier des Audiences, de l'éthyle silicate 40 a été utilisé, dosé à 96,4 %, et ajouté de gouttes d'acide chlorhydrique. Les résultats de ce traitement sont apparus positifs bien que les surfaces aient été exposées durant les saisons de faible pluie.

Pour la protection du sommet des murs, plusieurs tests ont été réalisés avec diverses proportions de matériaux variés et de produits chimiques. G. Chiari a recommandé l'utilisation d'un mélange de terre et de sable stabilisé au ciment, mais les résultats n'ont pas été positifs du fait d'une incompatibilité de ce mélange avec le contenu salin des structures. R. Morales a recommandé l'emploi de la terre stabilisée à la chaux rajoutée de *Primal AC-33* dilué à 10 et 20 % dans de l'eau, pour obtenir davantage de résistance aux intempéries. Des échantillons ont été réalisés à base de différents dosage de terre et de sable (2 : 1 ; 2 : 5 ; 3 : 1), stabilisés à la chaux ou au ciment pour certains d'entre eux, à des pourcentages de 2,5 %, 5 %, 7,5 %, 10 %, 15 % et 20 %. Ces échantillons ont été soumis à un test de résistance à l'érosion aux gouttes de pluie simulées et les meilleurs résultats ont été donnés par une stabilisation à la chaux à 10 %, bien que la coloration blanchâtre demeure un problème, au-delà de l'obtention d'une bonne résistance.

D'autres expériences de ré-attachement des reliefs, au mortier de terre consolidé au *Mowilith DMA-1H* à 5 % dans de l'eau, ont été réalisées en 1978, sur les haut reliefs du Couloir aux poissons et oiseaux du premier secteur de Tschudi. D'autres essais de consolidation d'enduits en terre-sable, avec le même produit ont été aussi réalisés. Mais encore d'autres tests avec de l'éthyle silicate 40, dans le secteur sud du Palais Rivero, qui ont donné de bons résultats.

Ce procédé de nouvelle fixation des enduits et de reliefs détachés, au *Mowilith DMA-1H* dilué à 5 % dans de l'eau, a été de nouveau appliqué, en 1980, sur d'autres secteurs du site, comme la plate-forme funéraire du Palais Rivero. Les résultats ont été jugés satisfaisants. Ce produit a aussi été largement utilisé pour la réalisation de couverture de protection, en consolidation de mortier de terre.

En 1982, d'autres systèmes de protection des sommets de mur ont été testés. Le matériau superficiel a été éliminé ainsi que les traitements antérieurs, avec la terre saline humide se trouvant en dessous. Les creux et les vides, les trous ont été bouchés avec du mortier de terre et de sable, après avoir humidifié les adobes originales à l'eau et à l'alcool et les avoir consolidées au *Mowilith DMA-1H* à 5 %. Dessus a été bâtie une couche d'adobes sacrificielles avec une pente du côté parement non décoré pour évacuer l'eau de surface. Un mortier de finition a été réalisé avec un mélange de terre et de sable consolidé au *Mowilith DMA-1H* mais dosé à 10 %. Pour les murs décorés sur leurs 2 parements, un petit toit en roseaux, réversible, a été posé sur leur sommet. Cette résistance du nouveau « *capping* » s'est avérée positive car le système a protégé le haut des murs de la pénétration de l'eau dans le matériau original. L'augmentation du dosage du consolidant a nettement amélioré la dureté et la résistance mais on a observé des problèmes d'adhérence de ce mortier de protection avec la couche d'adobe sacrificielle.

Au terme de ces différentes étapes d'essais de consolidants chimiques, en 1987-90, leur emploi intensif, et notamment l'emploi du *Mowilith DMA-1H*, a été reconsidéré. Une autre substance conglomerante d'origine végétale, le « *mucilago de tuna* », dont les propriétés principales améliorent la plasticité, la résistance à la compression et à la flexion, l'adhérence, la porosité, et la perméabilité des matériaux, tout en permettant de reproduire le traitement, a été testée. L'utilisation de ce produit naturel avait déjà été testée dans les années 60 pour la consolidation des reliefs, sans présenter d'altération des surfaces. La gomme de *mucilago* a été utilisée en dilution dans de l'eau, à 0,05 % et mélangée au mortier de terre, selon différents dosages, en fonction des parties

traitées. Par exemple, pour le « *capping* », le dosage a été le suivant : 1 partie de terre et 2 parties de sable grossier, 1 partie d'éclat de pierre et 1 litre de *mucilago*. Pour l'adhérence des enduits et des reliefs sur le mur-support, comme pour le comblement des lacunes, le dosage a été : 2 parties de sable fin, 1 partie d'argile fine et 0,05 % de *mucilago*. Sur les enduits, l'altération initiale de la couleur a disparu après 2 jours.

Les sommets de murs ont été reconstruits en supprimant le principe du plan incliné qui avait précédemment prévalu, pour mieux répartir une distribution homogène de l'eau sur ces sommets. Deux ou trois assises d'adobes sacrificielles ont été bâties, recouvertes de ce mortier de « *capping* » en terre-sable, fins éclats de pierres et *mucilago*, en vue d'obtenir une meilleure cohésion et résistance à l'érosion pluviale, tout en obtenant une texture plus rugueuse. Ce traitement s'est avéré excellent et a bien résisté à deux saisons successives de pluie. Mais en règle générale, l'expérience montre que ce traitement au *mucilago* présente une durabilité assez courte et oblige à répéter son application deux fois par an, ce qui représente effectivement une grosse charge d'entretien.

Dans la lignée de ce qui vient d'être évoqué, et à l'occasion de l'exposition Habiterre, **E. Hereida, J. Vargas et J. Barila**, (1995), ont rendu compte d'essais d'imperméabilisation des constructions en terre à partir de l'expérimentation en laboratoire de divers produits naturels. Ils ont sélectionné les substances suivantes : « *mucilago de tuna* », jus de banane, jus de caroubier et asphalte liquide. Ces expérimentations ont montré que l'on peut obtenir des résultats comparables avec le « *mucilago de tuna* » et l'asphalte liquide. En outre, la finition de l'enduit stabilisé avec ces produits, par un lissage à l'aide d'une pierre, d'abord rugueuse puis lisse, contribue à réduire les vides et donc à fermer la porosité de la surface, améliorant l'efficacité des produits.

III.12.4. - Autres procédés repérés, récemment expérimentés

Des procédés de consolidation des surfaces de nature physico-chimique, par utilisation d'un mélange d'agréats et de chaux, ou par injection d'un mélange d'argile, d'urée et de chaux, ont été repérés qui traduisent d'autres tendances récentes de la recherche expérimentale.

• Réaction pouzzolannique

B. Baradan (1990), évoque le principe de la consolidation physico-chimique des briques crues à partir de l'application d'un mélange constitué de 85 % de brique cuite pilée, de 12 % de cendres volantes (produit résiduel de la combustion du charbon dans les centrales thermiques), et de 3 % de chaux. Le nouveau matériau testé, après 28 jours de cure, a montré une amélioration considérable des propriétés de résistance à la compression et de durabilité résultant d'un effet pouzzolannique. Baradan ne propose pas de substituer ce type de matériau aux adobes traditionnelles mais d'envisager l'utilisation de ce mélange pour réaliser des enduits sur les murs d'adobe, considérant par ailleurs qu'une large palette de teintes peut être obtenue en faisant varier les proportions des ingrédients, sur un registre allant du rouge au gris.

• **Hydrophobisation par injection électrocynétique**

D.S. Moraru, L. Dima et L. Sandru, (1993), évoquent la possibilité de consolider les constructions « en argile », dans leur masse, par injection électrocynétique utilisant le transport d'une solution polaire de chaux en poudre hydratée (8% en poids), de bentonite (4% en poids), d'urée technique (8% en poids), et d'eau (80 % en poids). « Les argiles et les bentonites en solution sont des hydrosilicates et des hydroaluminates polaires et gonflables, et imperméabilisants. (...) La carbonatation de l'hydroxyde de calcium se produit en masse n'étant pas seulement limitée aux zones superficielles. (...) Ainsi l'argile de base se durcit (se consolide). (...) Le transport de la solution dans la masse à consolider peut se produire soit par chute libre en utilisant des entonnoirs spéciaux, soit électrocynétiquement à l'aide de dispositifs spéciaux ». Les auteurs concluent, entre autres arguments, que cette solution hydrophobante pénètre facilement grâce à une viscosité très réduite comparable à celle de l'eau ; qu'elle a une longue durabilité à l'état sec ; qu'elle n'altère pas l'aspect des matériaux traités étant pratiquement incolore ; qu'elle ne produit pas des effets indésirables.

Le principe d'hydrophobisation par « imperméabilisation » du matériau dans la masse est assez connu pour avoir été testé sur d'autres matériaux que la terre. Il faudrait disposer de davantage d'évaluation de ce type de produit, notamment sur la base d'essais grandeurs en laboratoire ou sur murets-tests, suivi d'une bonne campagne de « monitoring », pour attester de l'efficacité du procédé. De plus, l'utilisation de ce type de procédé devra sans aucun doute distinguer l'application sur des vestiges archéologiques ou sur des édifices historiques dont l'usage est réhabilité. Les comportements du matériau sont alors complètement différents et l'efficacité du procédé peut être alors très discutable.

III.13. - La conservation par l'emploi de produits chimiques

III.13.1. - Le développement des recherches et expérimentations sur la consolidation chimique

L'ouverture des recherches et l'engouement des chimistes et des chercheurs pour la consolidation des murs de terre à partir de l'emploi de consolidants chimiques utilisés en imprégnation par brossage ou en aspersion, ou encore en injection ou pénétration forcée, s'est confirmée à partir des années 70 même si quelques expériences antérieures avaient été réalisées, sur un mode pionnier. Il est remarquable de constater, avec cette révision de la littérature scientifique, que les contributions de chercheurs dans le domaine, sont assez nombreuses. Elles donnent aussi très souvent des informations similaires et donc redondantes. Notre effort de lecture a donc visé à identifier des contributions qui seraient plus à même de traduire les tendances d'évolution des recherches en la matière, tout en restituant des expériences à la fois décevantes et d'autres plus satisfaisantes, voire prometteuses. Néanmoins, n'étant pas chimiste, c'est donc en toute modestie et avec circonspection que nous rendons compte de ces recherches et expérimentations sur la consolidation chimique des murs d'adobe et des enduits en terre, en nous appuyant très directement sur les contributions des chercheurs et auteurs révisés au cours de ce travail. Si nous donnons aussi dans ce chapitre des éléments de résultat ou d'évaluation, on remarquera bien vite qu'ils sont souvent limités ou qu'ils traduisent une phase intermédiaire de « monitoring » des expérimentations. Aussi, nous réserverons

la présentation de quelques contributions relevant d'un niveau d'évaluation plus complet, pour la quatrième partie de cette révision littéraire. Enfin, bien que prolongeant le propos de ce chapitre, la question de la conservation des surfaces décorées, peintures et bas-reliefs, nous a semblé devoir être traitée dans une partie plus spécifique, afin de ne pas dissoudre le propos dans un énoncé trop vaste sur la consolidation chimique des maçonneries en terre crue, qui pourrait être alors confus.

III.13.2. - Silicate de potassium

A propos de la conservation des sites de Dadiwa et de Qinan County (Période Yangshao), Province du Gansu, en Chine, **Li Zuixiong** (1990), rapporte des expériences de consolidation des vestiges en terre, notamment riches en montmorillonite (argile gonflante), avec du silicate de potassium. Ces expériences suivent d'autres recherches antérieures qui avaient permis de tester d'autres produits comme l'alcool polyvinylique, les émulsions de polyvinyle-acétate, des solutions de silicate de sodium et de potassium présentant différents rapports molaires d'oxyde de métal et de dioxyde de silice. Ces expériences ont contribué à confirmer que le meilleur traitement était obtenu avec l'utilisation de silicate de potassium présentant un rapport molaire élevé de $\text{SiO}_2 : \text{K}_2\text{O}$, mélangé à un agent solidifiant. Mais l'auteur relève qu'il est essentiel de bien définir le rapport molaire optimal de $\text{SiO}_2 : \text{K}_2\text{O}$ pour préparer la solution aqueuse, car avec un rapport trop bas, on s'expose à des réactions carbonatées (création de carbonate de potassium) en présence de l'atmosphère et de l'humidité. Cela peut considérablement affaiblir le processus de cimentation de la fraction argileuse, de même quand le rapport de $\text{SiO}_2 : \text{K}_2\text{O}$ est trop élevé. Il s'agit donc bien de trouver le dosage optimal. De même les agents solidifiants qui sont utilisés peuvent avoir des effets néfastes. Ainsi après avoir testé l'utilisation de trichlorure d'aluminium, de trichlorure de fer, de fluosilicate de sodium ou de calcium, de sulfate de potassium et d'aluminium, c'est le fluosilicate de calcium qui est apparu être le plus approprié en fonction des paramètres de vitesse de solidification et de stabilité. Diverses éprouvettes de terre argileuse locale traitées au silicate de potassium (PS-C), avec des dosage de rapport molaire de $\text{SiO}_2 : \text{K}_2\text{O}$ différents, ont été ensuite testés sur leurs caractéristiques physiques et chimiques. Les résultats rapportés par Li Zuixiong sont les suivants :

• Résistance à l'eau :

Les éprouvettes ont été immergées dans l'eau pendant 16 mois. Ce sont celles avec des PS-C de rapport molaire élevé, (3.8 - 4.0), qui ont confirmé leur meilleur comportement, ne se désintégrant pas, alors que les éprouvettes à rapport molaire plus bas, (moins de 3.5), se sont désintégrées en un temps beaucoup plus court.

• Résistance au CO_2 :

La résistance au CO_2 est un paramètre important à considérer dans l'examen de la stabilité de la masse du matériau consolidé au PS-C. Dans le cas d'un rapport molaire trop bas, la formation de carbonate de calcium est augmentée et on constate une sorte d'efflorescence en surface de la masse cimentée au PS-C (qui devient blanche et visqueuse), au contact de l'air humide.

• **Résistance au climat :**

Des éprouvettes laissées à l'exposition solaire pendant six mois ont ensuite été testées à leur résistance à l'eau et au gaz carbonique de l'air. Les éprouvettes présentant un rapport molaire élevé témoignent d'une bonne stabilité et ne se désintègrent pas dans l'eau. Aucune détérioration n'a pu être observée en ambiance de vapeur d'eau saturée en CO₂.

• **Basicité de la masse traitée au PS-C :**

Du fait que la solution de silicate de potassium est une base forte, on pourrait considérer que le matériau traité serait instable et efflorescent à l'air. Mais ce n'est pas le cas. Car la silice et l'alumine contenues dans l'argile expansive ne peuvent opérer un processus de cimentation à l'eau et au calcium que si elles se trouvent dans un environnement basique amenant une augmentation de la résistance mécanique et de la stabilité de la masse traitée au PS-C. La valeur du pH = 10.

Le traitement au PS-C est apparu idéal en terme de consolidation, tout en conservant une bonne perméabilité au matériau

III.13.3. - Emulsions acryliques, polymères et copolymères

De nombreuses expériences de consolidation à partir de traitements aux émulsions acryliques en solution aqueuse, ou dans des solvants minéraux et autres produits, ont été tentées depuis la fin des années 70, et plus largement développées au cours des années 80. Sur la base de ces expériences qui ont pu être publiées, notamment grâce aux récentes conférences « Adobe'90 » (Las Cruces, U.S.A.), puis « Terra'93 » (Silves, Portugal), d'autres expérimentations ont été engagées au cours de ces années 90, notamment aux U.S.A.. Elles visent à développer une approche plus scientifique que pragmatique (souvent aléatoire), et à améliorer les premiers résultats évalués, qui n'ont pas donné satisfaction, ou qui témoignent encore de problèmes non résolus. Elles tentent aussi d'ouvrir d'autres voies de recherche. Voici quelques unes des contributions que nous avons choisi de relever.

• **Résine acrylique**

Selon la définition proposée par **G. Chiari** (1990), ce sont « de longues chaînes de polymères organiques dérivées d'un large éventail de monomères. Les plus couramment utilisés sont les acétates polyvinyliques (dont l'*Acryloid B72* et le *Primal AC33*), et les polyisocyanates. Ils peuvent être utilisés en solution dans des solvants organiques ou dans des émulsions aqueuses, ou bien encore, la polymérisation peut être obtenue *in situ* par l'emploi de catalyseurs ou par réaction avec l'humidité ambiante. » Mais selon Chiari, les émulsions présentent une « haute viscosité » et une « pénétration lente ». Pour lui, les émulsions devraient être appliquées « uniquement comme adhésifs, par injection dans l'épaisseur des murs et jamais en surface ». Le processus de consolidation obtenu par les résines synthétiques s'obtient lorsque le solvant s'évapore. Dans beaucoup de cas on observe une migration rétroactive du polymère vers la surface, avec la formation d'un film comme cela a été montré par de nombreuses expérimentations (voir le programme de Fort Selden). La plupart des résines synthétiques ne sont pas poreuses et contribuent à bloquer la migration de l'eau liquide ou en vapeur. Celle-ci exerce alors une pression sur le film de protection qui se détache. Avec un coefficient de dilatation thermique

plus important que l'adobe, la plupart des résines synthétiques soumises à des cycles de chaleur et de froidure (jour/nuit), ne tiennent pas. Mais, G. Chiari admet qu'elles présentent « de bonnes propriétés mécaniques, un certain degré de réversibilité (...) et qu'elles peuvent agir comme des adhésifs ».

S.P. Koob, M.H. Rogers, et G. Kenneth Sams (1990), rapportent des expériences de stabilisation des vestiges en adobe du site de Gordion, Turquie, à base de résine acrylique et de mortier de terre. Les deux méthodes sont présentées par les auteurs comme des traitements « temporaires » devant précéder des interventions à caractère plus définitif.

Divers produits ont été successivement testés sur le site, en 1982 et en 1989. Tout d'abord une résine acrylique de type *Acryloid A-21*, puis un dispersant colloïdal acrylique de type *Acrysol VS-24*. Ce deuxième type de produit a été choisi, selon les auteurs, pour ses « excellentes propriétés physiques et chimiques » et parce qu'il s'agit d'un polymère dont la taille des particules d'acrylique est très fine et doté d'un poids moléculaire élevé qui, une fois dispersé dans de l'eau, présente une très faible viscosité et donc une bonne capacité de pénétration. Des tests visant à préciser la concentration du produit ont montré que les briques poreuses pouvaient accepter jusqu'à un dosage à 20 %, qui a été finalement ramené à 4 %, du fait d'une moins bonne pénétration dans les parties de murs qui ont été indurés par des incendies. En comparant les essais de protection au mortier de terre et les essais de consolidation au polymère acrylique, les auteurs restent finalement très vagues. Ils relèvent l'intérêt de l'utilisation du mortier de terre pour son caractère esthétique respectant les traits du matériau original mais aussi la nécessité d'un entretien permanent. Quant à l'utilisation de l'*Acrysol VS-24*, ils ne semblent pas être en mesure d'en faire encore une évaluation précise. Ils relèvent que la question de la pénétration du produit reste essentielle, tout en ne pouvant confirmer sa force cohésive, sa concentration localisée et sa pénétration intérieure dans les structures traitées. Mais ces expérimentations « temporaires » restaient alors ouvertes sur la possibilité d'utiliser des méthodes d'imprégnation plus efficaces.

A propos de la conservation des structures en adobe du site égyptien d'Abusir, **Jiri Sramek et Ludvik Losos** (1990), chercheurs Tchécoslovaques, rapportent des expériences de consolidation à base de copolymères acryliques du type *Paraloid B72* et *KP-lak 709*, et à base de siloxanes hydrophobants du type *Wacker H* et *Silgel JMH 20*. Ce sont des produits commercialisés en Tchécoslovaquie. Ces expérimentations ont été ensuite analysées par Analyse Thermique Différentielle (ATD), et par thermogravimétrie (TG).

Les chercheurs relèvent une fois de plus que l'imprégnation des briques de terre requiert une technologie pouvant garantir une bonne profondeur de pénétration du produit sur plusieurs centimètres. La clé du problème réside donc dans le type de solvant utilisé. Il est prouvé que tous les types de solvants polaires comme l'eau, les alcools et l'acétone, sont rapidement absorbés par les minéraux argileux et provoquent des dégradations rapides à cause d'une expansion. Par contre, les solvants non polaires, comme le toluène ou le xylène, semblent plus appropriés pour les briques de terre. Néanmoins, les siloxanes hydrophobants ont été dilués à l'acétone. Ces produits n'ont été utilisés que pour une rapide imprégnation de surface, à la brosse, sur un traitement préalable aux copolymères acryliques.

Les auteurs rappellent que les matériaux acryliques présentent une meilleure résistance à la compression que les siloxanes mais qu'il ne peuvent être efficaces que si leur pénétration dans les briques de terre peut être garantie sur plusieurs centimètres. A des concentrations supérieures à 5 %, diluées dans du xylène, cette pénétration du produit a pu être observée jusqu'à 10-12 cm sur un temps d'environ 30 minutes. Le *Paraloïd B72*, à même concentration que le *KP-lak 709*, pénètre plus facilement et pour une concentration à seulement 2 %. Pour les deux produits, cette pénétration est encore plus aisée et profonde. Les tests réalisés *in situ* avec des imprégnations de solution à 5% dans du xylène, qui ont été recouvertes d'hydrophobant (*Wacker OH (R)* et de *Silgel JMH 20*, n'étaient pas encore évaluées à l'époque de la présentation de cette communication dans le cadre de Adobe'90. Mais les auteurs s'attendaient à ce que l'hydrolyse et la polymérisation des siloxanes pouvait être inhibée négativement par les conditions très sèches du climat saharien, les inclinant ainsi à rajouter 2 ml d'eau distillée dans les solutions de siloxanes, avant leur application.

• *Silanes et isocyanates*

Richard Coffman, Neville Agnew, Eric Doehne, chercheurs au GCI, et George Austin, du « *New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources* », (1990), ont présenté lors de Adobe'90, un bilan préliminaire d'une recherche sur la minéralogie, la variation de durabilité et de résistance au climat, de blocs d'adobes historiques et contemporains. Les adobes « historiques » ont été prélevées sur différents sites, en Chine, Egypte, au Salvador, en Israël et au Nouveau Mexique, et correspondent à une large plage de datation (de 3500 ans à 100 ans, selon les sites). Les adobes « contemporaines » sont produites au Nouveau Mexique et en Californie. Une étude de l'efficacité de deux consolidants chimiques sur des échantillons d'adobes, un silane et un isocyanate, a été également réalisée. Sans être une évaluation d'une « intervention », à proprement parler, les résultats fournis par les auteurs, nous semblent intéressants par le fait qu'ils mettent en relation certaines caractéristiques physiques et minéralogiques des adobes avec les traitements de consolidation chimique. Cette recherche ouvre des voies pour permettre une prise de décision sur la faisabilité de ce type de traitements, sur le terrain, en ayant au préalable une meilleure connaissance de la caractérisation physique et minéralogique des matériaux.

La minéralogie des adobes a été déterminée par analyse diffractométrique aux rayons X, (XRD). Une comparaison visuelle de la morphologie des argiles a été observée en microscopie électronique au scanner, (SEM), leur composition élémentaire a été définie par analyse aux rayons X en énergie dispersée, (EDS), et des analyses complémentaires en EDTA ont permis de déterminer les composants solubles, comme les carbonates de calcium et de magnésium, et les sulfates. D'autres tests de réaction à l'acide éthyléné-diaminetétraacétique, de détermination des composants organiques et volatiles par combustion, et de résistance naturelle à la désagrégation dans de l'eau déionisée, ont été réalisés. Quelques uns des échantillons ont été traités au SS-H, un silane durcisseur de pierre, de la firme ProSoCo Inc., ou au Desmodur N-3390 TM, un isocyanate fabriqué par la firme « *Mobay Corporation* ».

Les résultats préliminaires de ce programme, présentés en 1990, semblent indiquer que la variation de la minéralogie argileuse et de la texture granulaire, jouent un rôle significatif dans l'efficacité de la consolidation chimique. Sans entrer ici dans le détail de la caractérisation des matériaux, le lecteur pouvant se reporter au texte de communication, on notera que les auteurs relèvent que la

plupart des adobes historiques, comme cela était prévisible, sont composées principalement de quartz, feldspaths, argiles et parfois de calcite. La grande différence entre les adobes réside dans le type et la quantité de minéraux argileux en présence, dans les proportions granulaires (texture) et minéralogiques. La présence ou non de matériaux organiques (paille, p.e.), dépend des coutumes locales de production. La durabilité des adobes est fonction du type d'argile, de la distribution granulaire et de la présence d'un matériau de liaison complémentaire.

Ainsi, les adobes qui se sont montrées être les plus résistantes à la désagrégation sont celles qui ont été chauffées (à 300 ° C. pendant 18 heures), ou traitées chimiquement. Les adobes faiblement résistantes sont celles qui contenaient des minéraux argileux peu absorbants (kaolinite ou illite), ou qui contenaient du calcaire jouant un rôle de cimentation, ou encore assez de paille pour ralentir leur désagrégation à l'eau. Les adobes qui se sont désagrégées rapidement dans l'eau sont celles qui contenaient plus d'argile que les adobes résistantes, ou une quantité similaire d'argile, mais plus de sable et/ou moins de matériau organique. Ainsi, cela confirme que des adobes trop argileuses ou trop sableuses résistent mal à l'eau.

Quant à l'efficacité de la consolidation chimique, elle semble très liée à la minéralogie des argiles et/ou à l'état physique des adobes. Une adobe contenant un composant argileux incompatible avec le mélange de consolidant et de solvant en solution, sera difficile à traiter. Mais également, une adobe très sèche, friable et affectée par le climat, sera aussi plus difficile à traiter qu'une adobe fraîche et compacte. Un traitement préalable, à l'eau mélangée d'acétone, pour hydrater de nouveau les argiles est sans doute nécessaire avant le traitement chimique. Cela peut redonner de la cohésion et faciliter le traitement consolidant. Mais, à ce moment du développement des recherches, le problème de l'incompatibilité du solvant nécessitait des recherches complémentaires pour être contourné.

• *Isocyanate ou silane ?*

R. Coffman, Ch. Selwitz et N. Agnew (1990), rendent compte d'un programme de recherche sur la consolidation chimique de l'adobe, réalisé dans le cadre du projet Fort Selden II. Ce programme visait à évaluer l'amélioration de la résistance d'échantillons de mortier d'adobe moulé en forme d'éprouvettes cylindriques, produites à partir d'un mélange d'argile et de sable (1 : 4). Plusieurs types d'argiles étaient testées, selon leurs composants minéralogiques (montmorillonite et kaolinite). Les éprouvettes, une fois séchées au four (50° C.), étaient ensuite mises en ambiance thermique du laboratoire (22 ° C à 40-50 % d'humidité relative).

Les différentes éprouvettes ont été traitées soit à l'isocyanate ou au silane. L'isocyanate (un pré-polymère dérivé de l'HDI), est un produit commercial livré sous forme de concentration à 90 % dans un hydrocarbure parfumé mélangé à un solvant à base de n-butyle et d'acétate. Ce produit doit être dilué dans un mélange de xylène et de méthyle éthyle cétone (MEK), en proportion de 2 : 1, de façon à donner des solutions concentrées à 5 - 25 %. Quant aux silanes, se sont des tétraéthyleorthosilicates (TEOS, $(C_2H_5O)_4Si$), avec ou sans méthyletriéthoxysilane (MTEOS, $CH_3(C_2H_5O)_3Si$), ajoutés comme hydrophobant. Ce sont également des produits commerciaux qui présentent 75 % de solides actifs dans un solvant d'acétone-MEK. Les silanes ne nécessitent pas l'ajout d'un solvant complémentaire pour être utilisés. Les isocyanates polymérisent *in situ* en réagissant avec l'eau présente dans l'argile et forment

des liens d'urée qui libèrent du dioxyde de carbone. Les silanes polymérisent par hydrolyse, au contact de l'atmosphère et de l'humidité ambiante, créant un réseau de polymère Si-O qui crée des liens dans le matériau traité.

Chaque éprouvette a été traitée avec 3 à 6 ml de solution, puis recouverte, pour empêcher l'évaporation du solvant et permettre la bonne pénétration du consolidant. Après traitement et cure, les éprouvettes ont été testées à la résistance en compression (capacité de compression à 500 kg), à la résistance à la désagrégation dans l'eau (immersion pendant 48 heures, puis séchage au four et exposition à 10 cycles de mouillage/séchage), et à la porosité (porosimètre au mercure). Ces éprouvettes traitées étaient comparées avec des éprouvettes non traitées.

Pour résumer les résultats obtenus, ces traitements chimiques ont contribué à une nette amélioration de la résistance en compression (de 6 à 32 fois plus). Mais selon les types d'argiles, les effets des isocyanates et des silanes sont différents. De même la résistance à la désagrégation dans l'eau est nettement améliorée pour les éprouvettes traitées à l'isocyanate et dont l'argile est du type kaolinite alors que les effets ne sont pas aussi bons sur les argiles de type montmorillonite. Quant au traitement à base de silanes, il semble aussi bon pour les argiles kaolinitiques et beaucoup moins bon pour les montmorillonites. Mais, d'une manière générale, on peut dire que des améliorations sont atteintes par rapport aux éprouvettes non traitées. Sur l'aspect porosité, il ne semble pas que les consolidants employés aient eu des effets, les valeurs de porosité entre les éprouvettes traitées et non traitées se situant également entre 13% à 25 %.

Discutant leurs résultats, les chercheurs relèvent que les effets de tels consolidants, qui améliorent la résistance en compression et la résistance à la désagrégation dans l'eau, sont semble-t-il très tributaires de la texture des terres et aussi de la minéralogie de leur fraction argileuse. Car les silanes sont plus efficaces sur les kaolinites alors que les montmorillonites répondent mieux aux isocyanates. Mais la question de la pénétration du produit, et la question de sa concentration, sont essentielles car ce type de traitement peut aussi résulter en la création d'une sorte de peau extérieure polymérisée qui, au contraire, contribuera à accélérer le processus de dégradation de l'adobe en causant une séparation des couches de matériau traitées et non traitées. C'est notamment davantage le cas pour les traitements à base de silanes et moins à base d'isocyanate comme les auteurs ont pu l'observer à Fort Selden. La question de la bonne pénétration des traitements polymérisants reste essentielle pour les chercheurs du GCI.

Pour d'autres informations concernant le traitement de l'adobe aux consolidants polymérisants, on pourra aussi se reporter à F. M. Helmi (1990), de l'Université du Caire, qui rend compte de résultats de ce type de traitement dans le recueil des communications de Adobe '90. Les expérimentations rapportées concernent les sites égyptiens de Abusir et de Mataria. Des échantillons de briques d'adobe ont été traités au tétraéthoxysilane (TEOS), au méthyletriméthoxysilane (MTMOS), et au copolymère de méthyleméthacrylate-butyleacrylate (MMABA). L'auteur discute les résultats sur la base de résultats d'analyses minéralogiques par diffraction aux rayons X et d'examen en microscopie électronique au scanner (SEM). Dans ce cas, c'est l'utilisation de TEOS qui a donné les meilleurs résultats, vraisemblablement du fait de sa faible viscosité et donc de sa bonne pénétration. Se référant à d'autres travaux de B.M. Fielden (1982), de R.M. Gamarra (1983) et de S.Z. Lewin, F. M. Helmi corrobore leurs résultats en disant que l'utilisation de TEOS, avec ou sans MTMOS et MEOS, peut être un bon traitement de surface des adobes. Par

contre, l'auteur signale que l'utilisation de MTMOS comme hydrophobant, après avoir traité les adobes au TEOS - MMABA, doit être exclue car on observe une fissuration dans le temps et des effets de l'exposition aux U.V., en plus d'une fragilisation des liens polymérisants dans la structure de l'adobe.

• **Rhoplex ® E-330 et autres tests comparant divers produits**

Charles Selwitz (1994), précédemment cité évoque une autre expérimentation réalisée dans le courant de l'année 1993, dans le cadre du programme de conservation de Fort Selden. Il s'agit d'une procédure d'imprégnation par vaporisation d'un durcisseur de pierre, le SSH qui est un mélange d'alkoxysilanes monomérique, après avoir réalisé une préparation du mur par brossage afin d'ôter tout matériau de surface pulvérulent. Deux étapes suivantes impliquent une imprégnation à base de systèmes aqueux, constitués à partir de sable, de terre argileuse et d'une émulsion acrylique aqueuse, au lieu d'employer directement de l'eau. Cette émulsion est basée sur l'emploi de *Rhoplex ® E-330*, (firme *Rohm et Haas*), un amine contenant un terpolymère acrylique ou autrement défini comme un copolymère résultant d'une combinaison de méthacrylate et d'éthyle acrylate dispersé en solution aqueuse (cf. R. Hartzel, 1996, ci-après). La terre modifiée par ajout de polymère est utilisée pour réaliser une protection du sommet du mur préalablement consolidé. Quant cette couverture est sèche, une couche plus fine de terre est appliquée sur l'ensemble du mur, en utilisant un projecteur à enduit, de manière à réaliser une couche qui conserve la couleur et l'aspect du mur original. Finalement, ce produit est traité avec une vaporisation de poly(méthylehydrosiloxane), en forme de spirit minéral, pour garantir une hydrophobisation (« water repellency »). Les quatre parties traitées de cette façon ont subi un deuxième hiver sous le climat du Sud du Nouveau Mexique, sans détérioration observable et présentent de bonnes conditions.

Dans le n° 1 de la Revue CMAS, **Charles Selwitz**, (1995), présente plus complètement la continuation du programme de recherche-expérimentation sur la protection de l'adobe par consolidation chimique entrepris à Fort Selden. Il rappelle les résultats obtenus par son collègue Neville Agnew sur des essais lancés en 1988, ayant permis de tester sur des murs construits en adobe récentes, les consolidants suivants : du *Mobay's DN3390*, (un diisocyanurate trimer d'hexaméthylène diisocyanate) et du *ProSoCo's SSH*, (un mélange d'éthyle silicate et de méthyletriéthoxysilane). D'après l'auteur, le traitement au SSH a donné de meilleurs résultats. Mais, ce qui est plus remarquable c'est que les mêmes produits testés sur des murs construits en adobes plus anciennes, n'ont pas du tout donné le même effet, voire des résultats plutôt décevants. Ch. Selwitz évoque des observations déjà faites par Piggot et Butterbaugh (1977), à propos de recherches réalisées en Iran, qui semblent rapporter ce résultat décevant à la perte de cohésion des vestiges d'adobe restant exposés à des cycles répétés de mouillage et séchage, dans le temps. Mais Ch. Selwitz attribue aussi le résultat aux techniques employées et notamment à la pénétration forcée par infiltration, dans des murs somme toute assez fragiles. Mais encore au fait que le contrôle de l'évaporation du solvant des solutions de polymères, par une protection avec un film de polyéthylène, n'est pas aussi garanti du fait de l'irrégularité des formes des murs anciens, par rapport à des murs nouveaux. Si l'évaporation est trop rapide, le consolidant ne pénètre pas assez en profondeur du matériau et opère une migration rétroactive vers la surface, en générant des croûtes qui peuvent s'écailler ou se délaminer. Reprenant des essais décrits par Huang (1990), Ch. Selwitz évoque le principe de la protection des murs fraîchement consolidés par un enduit de terre revêtu d'un hydrophobant, qui joue le rôle de barrière contre l'évaporation du produit

consolidant. Cette barrière temporaire peut être enlevée lorsque le mur consolidé a séché. Il est conseillé, dans l'optique du traitement possible de larges quantités de murs, de projeter cet enduit de protection mécaniquement et non de le réaliser à la main ou à la truelle, ce qui prendrait beaucoup trop de temps. Par ailleurs, des essais réalisés en 1991, durant une période pluvieuse, ont montré que cet enduit de terre de protection reste très adhérent aux murs consolidés, indiquant qu'il serait préférable de réaliser un tel traitement par saison sèche. Cette protection extérieure par un enduit de terre peu épais présente aussi l'avantage de pouvoir épouser les contours des formes originales du mur consolidé et d'harmoniser la coloration, tout en recouvrant les fissures du mur original qui sont des voies d'infiltration de l'eau. De plus l'entretien peut se faire sur cette couche de protection sans avoir à toucher le matériau d'origine.

Le principe évoqué a donc été testé à Fort Selden, à partir d'expérimentations réalisées en octobre 1992. Les murets d'essai sont traités par imprégnation, en aspersion, à l'alkoxysilane. Leur sommet est protégé par un mortier de terre amendée en sable, stabilisé avec un polymère en solution aqueuse, du RE-330. Différents dosages de solution aqueuse de polymère sont testés sur 3 murets (A, B et C), pour la protection du sommet (8 %, 14 % et 8 %), ainsi que différents rapports d'amendement en sable de la terre (3:8 ; 3:8 et 1:1). Pour la barrière de protection contre l'évaporation du consolidant, exécutée en enduit de terre (épaisse de 2 mm), les dosages en solution aqueuse de polymère sont identiques (8 % et 14 % et 8 %) et les rapports de sable et de terre sont différents (3:8 ; 1:12 et terre seule). Ces dosages différents sont destinés à tester sur le mur sec les paramètres de résistance mécanique, de résistance à l'eau, de durabilité, de résistance à l'érosion, de texture de surface, qui peuvent être affectés selon les quantités de produits chimiques et d'agrégats.

Les premières observations ont montré que la protection du sommet des murs-tests, lorsqu'elle est trop épaisse, génère des fissurations au séchage. Quant à la fissuration de l'enduit de protection des murs en terre amendée, ainsi que sa texture trop granuleuse, elles peuvent être contrôlées par un ajout de sable ou en retravaillant le mortier frais, à la truelle, dès que ces fissurations apparaissent. Enfin, ces murs d'adobe consolidés chimiquement au SSH et revêtus d'un enduit de protection contre l'évaporation en terre amendée, ont été ensuite aspergés d'un produit hydrophobant commercial, du « El Rey Adobe Protector », un poly (méthylehydrosiloxane) en solution de spirits minéraux, sur une moitié de leur surface.

Ch. Selwitz, commente ensuite les résultats observés en mai 1993, après que les murs-tests aient été exposés aux rudesses d'un hiver sévère. Les murs revêtus d'hydrophobant ont montré une absence d'érosion et de fissuration alors que ceux qui n'ont pas reçu l'hydrophobant présentent de plus mauvais résultats. Les surfaces adjacentes traitées et celles non traitées n'ont pas montré de variation de coloration. Ces premières observations doivent être complétées par un suivi du « monitoring », sur plusieurs années, qui devrait également donner des indications sur le type d'entretien requis.

Prolongeant le propos de Charles Selwitz, dans un rapport sur une recherche réalisée dans le cadre d'un programme de conservation de « l'*Intermountain Cultural Resource Center* » du « *National Park Service* », développé en collaboration avec le Laboratoire de Conservation Architecturale de l'Université de Pennsylvanie, **Robert Hartzel** (1996), rend compte de tests de consolidation chimique des mortiers de terre modifiés par amendement en *Rhoplex*® E-330. Il s'agit pour simplifier d'une émulsion acrylique contenant approximativement

47 % de solides par poids dans une solution aqueuse alcaline, dont le pH se situe entre 9.5 et 10.5, dont la gravité spécifique est de 1.0 à 1.2., et dont les points de gel et d'ébullition sont similaires à ceux de l'eau. L'émulsion peut être stockée sous forme stable de 34 ° F à 120 ° F en pouvant subir 5 cycles de gel-dégel. A l'état sec, le polymère est stable jusqu'à 350 ° F, point de t° au-delà duquel il entre en décomposition.

Le produit a été successivement expérimenté, en laboratoire, puis sur le terrain, depuis le début des années 70, notamment par Darrel J. Butterbaugh, scientifique et directeur retraité de la firme Rohm et Haas. Ces expérimentations ont été développées sur les sites du sud-ouest des USA, notamment à Chaco Canyon, dans le cadre du programme de conservation du « *National Park Service* », par J. Kriegh et H. Sultan, mais aussi par D. Fenn, (1975). Les expérimentations de laboratoire de D.J. Butterbaugh se poursuivaient sur le terrain, en association avec V. Pigott, en Iran, puis au Guatemala. D. Fenn continuait ses expériences à Chaco (1976), puis en association, avec J. Deck, (1978-79), confirmant alors que les mortiers de terre amendés au RE-330 se comportait bien après 3 ans d'exposition au climat. Mais, d'autres expériences menées sur d'autres sites, comme à Mesa Verde, par R. Begay, observées par R. Hartzel en 1994, donnaient des résultats plus décevants, les mortiers ayant tendance à se désagréger. Ce même produit a été également utilisé sur le site des Ruines d'Aztec, depuis environ 1983, par J. Brown, avec des résultats plus satisfaisants, montrant également l'absence d'impact sur la coloration. En 1994, R. Hartzel observait les expérimentations menées à Chaco, où l'on avait commencé à abandonner l'usage du RE-330, remplacé par du *Daraweld C*, une émulsion polyvinylique. Ce changement semble aussi correspondre à un changement de sol utilisé pour produire les mortiers. Mais, ces nouvelles expériences menées à Chaco, avec ces mortiers amendés n'étaient pas très concluantes, avec des problèmes de fissuration et de désagrégation semblant résulter d'un mauvais comportement aux cycles successifs de mouillage et de séchage. Pourtant, les expériences antérieures réalisées par D. Fenn, en 1976, continuaient à présenter de bons résultats.

D'autres tests ont donc été engagés, visant à expérimenter à nouveau l'amendement en RE-330 sur différents types de sols venant des sites de Mesa Verde, de Aztec et de Chaco. Selon les mortiers testés, le dosage en RE-330 dans l'eau de préparation a varié entre 0 %, 6 %, 12.5 %, 25 % et 33 %. Ces matériaux préparés sous forme d'éprouvettes cylindriques ou parallélépipédiques (selon les types d'essais), ont été finement caractérisés en application d'un protocole de 9 paramètres (cf. Chap. I où nous avons déjà référencé cette contribution de R. Hartzel quant aux aspects analyses et essais sur le matériau). Ils ont été ensuite testés au mouillage/séchage, gel/dégel, à la rupture, à la transmission de la vapeur d'eau, à la coloration sèche et humide, puis à l'analyse en microscopie électronique au scanner (SEM).

Dans la discussion finale de son rapport de recherche, R. Hartzel commente les résultats en relevant les effets du produit sur les différents sols testés.

- l'augmentation du dosage en *Rhoplex E-330* a des effets sur l'augmentation de la résistance en traction, quel que soit le type de sol ;
- l'augmentation du dosage en *Rhoplex E-330* a des effets sur la transmission de la vapeur d'eau, en diminuant la perméabilité des mortiers ;
- même avec un dosage minimal de 6 %, comparé à des mortiers non amendés, le *Rhoplex E-330* augmente la résistance à l'eau (testée par immersion pendant 5 heures pour le test de mouillage/séchage) ;

- Le produit a aussi des effets sur la résistance au gel/dégel et l'augmentation du dosage améliore la résistance du mortier ;
- Le *Rhoplex E-330*, comme prévu, n'a pas d'effet sur un changement de coloration des mortiers.

Dans l'ensemble, ce sont les sols les plus plastiques, riches en argiles et en limon, qui résistent le mieux à la flexion, qu'ils soient amendés ou non. Ces sols plastiques sont évidemment sujets à davantage de retrait au séchage que les sols sableux. Testés à la transmission à la vapeur d'eau, les sols sableux ne montrent pas une relation évidente, avec des réactions extrêmes. Mais dans l'ensemble, l'ajout de *Rhoplex E-330*, diminue la perméabilité. Au test de mouillage séchage, les sols argileux résistent mieux que les sols sableux, non amendés en produit, et sont les plus résistants mais tous de désintègrent durant les 5 heures d'immersion. Pour le test de gel/dégel, les sols montrent des comportements marqués. Les sols sableux s'effondrent en perdant leur cohésion granulaire, tout en gardant le même volume, avec une légère contraction en longueur et expansion en largeur. Les éprouvettes en sols argileux gonflent, expansent en largeur bien qu'il conservent la même hauteur.

La durabilité et la détérioration des mortiers sont tributaires de nombreux facteurs comme les rudesses du climat saisonnier et les variations marquées de température de l'air sur 24 heures. De plus selon la carrière de terre, et donc selon leur texture comme leur minéralogie, le comportement est différent. L'exposition des ruines au climat, à l'ensoleillement, leur protection, sont aussi des facteurs influents. Enfin, la précision des dosages, sur le terrain, comme les modes de préparation des mortiers, restent sujets à la variation insuffisamment contrôlée des pratiques des équipes d'entretien, contribuant à des effets différents. Ce sont là autant de variables que R. Hartzel discutent ensuite en détail. Ainsi,

- les variations de température, et notamment de la chaleur sembleraient pouvoir être limitées à la couche superficielle des mortiers ;
- les mêmes sols se comportent différemment selon qu'il sont utilisés pour produire des briques d'adobe ou des mortiers de terre ; la texture et la minéralogie sont sans doute les principaux facteurs de la durabilité des mortiers ;
- la « géométrie » des murs exposés au climat, la structure des maçonneries (liaison entre les pièces), l'orientation de cette exposition (soleil ou ombre), et notamment la durée de séjour de l'eau (pluie ou neige), sur les joints des maçonneries, sont des facteurs importants pour la dégradation des mortiers ;
- les pratiques de terrain restent empiriques, varient selon les équipes, et ne correspondent pas aux conditions contrôlées de laboratoire ; de plus quel est le climat idéal pour réaliser le traitement ?

Les amendements en produit acrylique contribuent à renforcer les mortiers mais réduisent la perméabilité. Cela n'est pas un problème pour les sols sableux où les polymère améliorent la cohésion granulaire, tout en conservant au sol assez de porosité et de perméabilité pour résister au gel/dégel. Leur faible activité au gonflement et retrait est aussi un atout certain. Les sols argileux et limoneux se comportent beaucoup moins bien car l'ajout d'acrylique ne supprime pas toute l'attraction de l'eau par les argiles. De plus, l'activité de ces sols est telle que les cycles de mouillage/séchage ou de gel/dégel contribuent à générer des ruptures des liens polymériques. Il faudrait ajouter tant de produit que cela deviendrait rédhibitoire quant au coût, et que les effets seraient alors comparables à l'ajout de ciment. Le phénomène d'hydroplastilisation du polymère dans l'eau est difficile à contrôler et semble dépendre du pH comme de la durée de séchage. Cet effet est très variable selon les polymères ou les acryliques employés. Il

faudrait en outre mieux intégrer les variations des paramètres climatiques dans l'ambiance d'expérimentation du laboratoire, de manière à mieux coller aux conditions macro-environnementales des sites. Cela est notamment important pour la vitesse de séchage qui peut contribuer à la dégradation du film de liaison polymérique, même si le produit présente une élasticité. Enfin, il semblerait que les liens polymériques soient très affectés par les cycles répétés de gel/dégel qui exercent d'importantes contraintes sur les liens polymériques à l'intérieur du mortier, entraînant des ruptures.

R. Hartzel, relève toute l'importance d'un meilleur contrôle des variables pouvant affecter les effets de la consolidation au Rhoplex E-330 et particulièrement les variables d'environnement, à savoir les facteurs climatiques dont les effets ne sont pas aussi clairs, les pratiques humaines, la nature des sols employés, dont leur minéralogie, et leur texture. La recherche devrait aussi se poursuivre en comparant l'effet de produits plus variés, y compris l'aluminate de calcium, certains ciments peu salins ou la chaux. Enfin, les expériences positives de Denis Fenn, à Chaco, mériteraient, selon R. Hartzel, d'être plus profondément étudiées.

• **Quelques recommandations à propos du Rhoplex® E-330**

On a déjà discuté et référencé la recherche menée par **R. Hartzel**, (1996), sur les mortiers de terre modifiés à l'acrylique. Le chercheur décrivait les propriétés des mortiers de terre, modifiées par traitement au *Rhoplex E-330*, tout en discutant les paramètres de l'efficacité de cette consolidation (essentiellement environnementaux). Au-delà de ces résultats, R. Hartzel donne des recommandations qui ont valeur d'évaluation. Pour lui, « les amendements en émulsion polymérique ne sont pas « la » réponse à la durabilité des mortiers de terre ». Cette nouvelle technologie complète les recherches antérieures faites sur la stabilisation des mortiers au ciment ou à l'asphalte qui n'ont pas toujours donné pleine satisfaction. Mais Hartzel observe que « les expérimentateurs exposent l'adobe à des amendements polymériques et des consolidants de plus en plus complexes ». « Toutes ces interventions chimiques présentent des risques » (« liabilities »). Selon la nature des sols, la situation et l'état des ruines, l'amendement en produits chimiques, en visant des effets à long terme, n'ira pas sans générer « des problèmes à long terme ». Ainsi, les aspects positifs ou négatifs d'amendements en produits autres que le *Rhoplex E-330*, doivent être évalués par d'autres recherches. Hartzel relève très justement que « l'amendement des sols utilisés en mortiers ne représente qu'une partie du répertoire des techniques de stabilisation disponibles pour les opérateurs des sites. Le répertoire inclut aussi le « *backfilling* » et la protection par abri, les enduits sacrificiels, et les réparations en sol non amendé ». Hartzel relève que la première considération pour choisir un mode de réparation et de rechercher le meilleur sol ou le meilleur « groupe de sols qui réponde aux exigences de couleur et de texture ». Certes, le *Rhoplex E-330* répond à ces exigences car il n'altère par la couleur et la texture d'un mortier de terre. Les sols sableux (60-65 % de sable grossier), et peu argileux (10-15 % d'argile), sont ceux qui réagissent le mieux au traitement au *Rhoplex E-330*. Il faut également choisir un sol qui n'opère que très peu de retrait. La durabilité des sols sableux traités avec ce produit est bien meilleure que celle des sols silteux-argileux. Mais ce produit, même ajouté en proportion supérieure à 33 % en solution aqueuse ne pallie pas les caractéristiques naturelles d'un sol. Ainsi, les sols sableux, poreux et perméables, restent poreux et perméables. Ainsi les sols à dominante de particules fines (silts, argiles), continuent à gonfler et à faire du retrait. Ce facteur est essentiel à considérer pour comprendre la performance du produit. Hartzel conclue en disant qu'« il n'y a pas qu'une seule réponse pour résoudre les problèmes de la détérioration des mortiers de terre : il y a seulement des solutions alternatives, chacune avec ses bénéfices et ses risques ».

III.13.4. – Polysilicates, éthyle silicate et produits similaires :

• **Les polysilicates :**

Dans le Bulletin n° 10 du Comité ICOMOS US, **Charles Selwitz** (1994), chercheur au GCI, rend compte des expérimentations menées sur la consolidation chimique de murs-tests, dans le cadre du programme de conservation de Fort Selden. Il évoque notamment une expérimentation s'appuyant sur les travaux de G. Chiari réalisée dans le cours de l'année 1993.

Selwitz rappelle en effet que des essais ont été réalisés avec des poly(éthyle silicate)s, au lieu de systématiser l'emploi du SSH, pour une consolidation initiale, car les polysilicates sont moins onéreux. Des essais ont été réalisés à partir de l'emploi de *Silbond 40*, composé à partir de 70 % de poly(éthyle silicate), de 27 % d'éthyle silicate et de 3% d'éthanol. C'est un produit non

volatile et non toxique présentant une viscosité de 3.9 centistokes à 25 ° C., ce qui est plus élevé que le SSH, qui présente une valeur de viscosité de 0,8. Néanmoins, la vaporisation liquide du *Silbond 40* sur des vestiges en adobe de Fort Selden, montre que 300 ml peut être absorbé par une surface d'environ 30 cm² (1 square foot), sans qu'il y ait un écoulement, et que le produit pénètre facilement à une profondeur de 20-25 mm. Sa cure, sans catalyseur, est lente. Sous des températures de l'ordre de 80-90 ° F., seul 5 mm d'épaisseur de matériau durci a pu être observé après 3 semaines. Le méthyle borate est un catalyseur efficace à un dosage optimal de 2 % et la cure est totale après 2 jours. Ainsi, une deuxième application de *Silbond-40*, ajouté de méthyle borate, sur une partie préalablement traitée sans catalyseur, a montré que la pénétration pouvait atteindre 40-45 mm. Mais la cure, à cette profondeur, est ralentie. Si l'on rajoute trop de méthyle borate, on observe des fissurations. Ces murs ont subi une forte averse de grêle et l'un des murs traité au *Silbond-40* sans catalyseur, qui avait seulement commencé son durcissement, a subi des éclatements de surface. Cela n'est pas arrivé sur des sections de murs qui avaient totalement réalisé leur cure.

• **L'éthyle silicate pour le traitement de surface et de sommets de murs :**

Nous référant encore à la définition proposée par **G. Chiari** (1990, l'éthyle silicate est un produit à la fois organique et non organique qui ne laisse après sa cure achevée qu'un « résidu purement non organique ». Chiari décrit ensuite la réaction d'hydrolyse au contact de l'eau suivie d'une condensation ou polymérisation. Mais selon lui, pour l'adobe, il est préférable de ne pas hâter la réaction et donc d'éviter l'ajout d'acide. Le traitement à l'éthyle silicate contribue à préserver les liens entre les particules argileuses qui peuvent être détériorées par l'eau. Dans un premier temps, la formation d'un gel de silice dans les pores du matériau réduit la porosité totale. Avec le processus de polymérisation, le gel de silice se contracte et les pores se rouvrent. Avec le temps, le produit se dissout mais les particules d'argile demeurent liées. Ainsi, Chiari précise que « l'effet du traitement est de conférer au matériau de la résistance à l'eau mais pas d'hydrophobisation, ni pour un état liquide ou de vapeur ». Mais, ce traitement est « totalement irréversible, violant le principe que toute intervention de consolidation devrait être totalement réversible ». Chiari relève cependant que le traitement n'amène que peu de modifications qui « peuvent justifier l'irréversibilité ». Enfin, du fait que « la porosité et la polarité du matériau sont pratiquement inchangées », d'autres traitements peuvent être appliqués. L'application du traitement par aspersion est facile et la pénétration plus importante dans les parties plus poreuses. Cela est pour Chiari, un avantage, car il en résulte « une séparation très irrégulière entre les parties traitées et non traitées. Ce qui réduit fortement les possibilités d'un détachement de la couche consolidée ». En outre, « le nettoyage de la surface et l'extraction des sels solubles peuvent être opérés après la consolidation, ce qui n'est pas possible avec des résines synthétiques ». Chiari reconnaît que l'irréversibilité reste néanmoins un désavantage ainsi que l'impossibilité de traiter des surfaces humides (accélération de la polymérisation et détachement), du moins le pense-t-il alors, ce qui sera remis en discussion par des recherches ultérieures. Par ailleurs, le produit n'est pas un adhésif mais seulement un consolidant.

A l'occasion de « Adobe'90 », Giacomo Chiari proposait une évaluation à long terme de différents traitements chimiques (résines synthétiques et éthyle silicate) des surfaces et des sommets des structures en terre.

Pour Chiari, un consolidant « idéal » pour le traitement des adobes, doit présenter les caractéristiques suivantes :

- « - procurer une résistance à l'eau mais ne pas être hydrophobe, de manière à permettre les migrations d'eau à l'état liquide comme de vapeur ;
- laisser les pores et les capillaires ouverts et autoriser la possibilité d'autres traitements, même avec d'autres produits ;
- procurer une résistance mécanique et à l'abrasion en condition sèche comme humide ;
- présenter une bonne pénétration c'est à dire une faible viscosité ;
- ne pas former de film en surface, ni montrer une frontière planaire abrupte avec les parties non traitées dans l'épaisseur ;
- présenter un coefficient de dilatation thermique similaire à celui de l'adobe ;
- ne pas changer la coloration, ou causer de brillance ;
- pouvoir résister aux contraintes générées par la cristallisation des sels, aux remontées capillaires et aux cycles de gel-dégel ;
- être durable, c'est à dire être résistant à l'eau et à la photo-oxydation ;
- être facile à appliquer, même lors de conditions climatiques humides, et être bon marché ;
- ne pas être dangereux pour les opérateurs ;
- être réversible, si possible. »

Mais devant une telle liste de paramètres, G. Chiari avoue volontiers qu'un tel produit présentant ces caractéristiques « n'existe pas ».

Dans l'ensemble des produits utilisés, principalement des résines synthétiques généralement thermoplastiques et des éthoxysilanes, on doit remarquer que les comportements peuvent varier même pour une composition nominale identique. Ainsi, Chiari note que la technique d'application peut influencer les résultats. Par ailleurs, les résultats obtenus en laboratoire, sur des tests accélérés, doivent toujours être comparés à des tests de terrain. G. Chiari encourage la procédure de tests comparés sur des murs, comme il s'en fait aux U.S.A. (Fort Selden) ou en France, à Grenoble (cf. *supra*). Il présente ensuite les différents types de consolidants chimiques couramment utilisés.

G. Chiari a évalué diverses expériences de traitements qui ont été réalisées sous sa conduite, en Irak, en région de Séleucie et à Hatra, en 1969. Un traitement test préalable à l'éthyle silicate, a porté sur 1 m² de mur, en utilisant un mélange de 1 litre de Silvester ZNS, de 3 litres d'alcool éthylique et d'1 ml d'acide hydrochlorique. Simultanément, des essais de « capping » en terre-sable stabilisé au ciment, à 5 - 8 % (sur les « Archives » de Séleucie) et en protection de surface des vestiges en adobe, par un revêtement « sacrificiel » de briques moulées à partir d'un mélange de terre-sable stabilisé au ciment, ainsi que la mise en place d'un système de drainage de surface, pour diviser le ruissellement (à Tell 'Umar), ont été entrepris.

Au printemps de 1971, une première évaluation confirme une « condition parfaite » et l'on peut noter « une différence entre les parties traitées et non traitées qui avaient déjà sévèrement souffert de la pluie ». Le « capping » en terre-sable stabilisé montrait des fissures avec des dommages résultant de l'infiltration de l'eau. Le couronnement en briques stabilisée était « parfaitement préservé à l'exception des murs verticaux proches de la fin du système de drainage qui, immergés dans l'eau, s'étaient effondrés ». Des réparations ont été entreprises mais par la suite aucun entretien n'a été assuré et le site a été abandonné.

Vingt ans après, en mai 1989, une évaluation critique des travaux a été entreprise. A Tell 'Umar, c'est la protection par couronnement en briques de terre stabilisée qui a le mieux résisté. Quant au drainage de surface, il a prouvé son efficacité bien que l'eau ait pu parfois suivre son propre cheminement et causer alors des dommages importants. Chiari relève la « nécessité d'un entretien ». Car les racines de la végétation qui a poussée ont contribué à l'effondrement de murs verticaux ; car les parties qui n'ont pas été protégées par les briques de terre stabilisée ont été largement érodées par la pluie. Cette protection par les briques stabilisées s'est avérée très efficace bien qu'il faille reconnaître que le matériau original ait été dissimulé. Chiari discute la réversibilité possible de ce traitement qu'il ne faut selon lui en aucun cas comparer à une « reconstruction massive ». Sur les « Archives » de Séleucie, les conditions générales sont apparues très décevantes. Les pièces étaient comblées par du matériau effondré des murs ou apporté par le vent. Quelques parties du « *capping* » en terre stabilisée a résisté alors que d'autres, qui avaient beaucoup fissuré, ont permis à l'eau de s'infiltrer et de causer de graves dégâts. Ainsi Chiari pense que pour des pièces situées en dessus du niveau du terrain, qui ne sont pas drainées et qui sont des cuvettes d'eau, il vaut mieux les protéger par « *backfilling* ». Sur un site voisin, celui de « Via Porticata », seules les parties protégées par un « *capping* » ont mieux résisté bien qu'étant aussi dégradées. Le reste a littéralement fondu. Ainsi, le principe du « *capping* » ralentit la vitesse de détérioration. Mais il faut que ce procédé soit associé à un drainage et aussi à un entretien. Chiari soulève aussi le fait qu'un mur protégé par un « *capping* » doit aussi être consolidé pour ses parements verticaux, au risque de rendre cette protection du sommet inefficace. Quant aux traitements à l'éthyle silicate, sur les « Archives » de Séleucie, il n'a pas été possible de le localiser après excavation. La teneur en eau et en sels est apparue très élevée et les remontées d'eau de la nappe phréatique ont activé aussitôt l'apparition d'efflorescences, dans le jour qui a suivi l'excavation. Chiari constate que sur une longue période de vingt ans, le traitement à éthyle silicate sur un mur très exposé à l'humidité, n'est « pas assez effectif pour le protéger ». Par contre, sur le site de Hatra, pour un mur moins exposé aux remontées de la nappe phréatique et élevé sur un soubassement en pierres, il a été possible de comparer les effets de la pluie sur les parties traitées et non traitées. Le mur ne s'est pas effondré. La rangée supérieure d'adobe a été laissée sans traitement pour pouvoir comparer les effets. Le matériau de ces briques a été délavé et a recouvert les adobes traitées en partie inférieure. Ce dépôt de terre a pu être nettoyé par brossage sans affecter la surface consolidée parfaitement conservée. Chiari conclue que dans ce cas comme pour d'autres réalisés à Chan Chan, l'éthyle silicate peut préserver des effets de la pluie, sur une durée de 20 ans.

Dans sa conclusion, Chiari relève que les interventions suivantes peuvent être considérées comme positives :

- le revêtement des murs par une couche sacrificielle de nouvelles briques (le procédé reste discutable) ;
- les réparations de murs déjà endommagés par l'emploi de briques identiques quand elles sont bien adhérentes à la partie originale ;
- la réalisation d'un drainage de surface de la pluie avec des briques renforcées, en prévoyant des cheminements adéquats ;
- le traitement de surface vertical des murs à l'éthyle silicate quand la base des murs est protégée des dommages de l'eau.

Mais il est nécessaire d'évaluer régulièrement les interventions pour corriger de possibles erreurs ; comme il est indispensable d'assurer un entretien. Les « *capping* » en terre stabilisée au ciment produisent des résultats, mais

insuffisants pour préserver les murs sur une longue période sous des conditions climatiques sévères (« Archives » de Séleucie). La stagnation de l'eau à la base des murs est le problème le plus important. Enfin Chiari note que « le traitement à l'éthyle silicate sur la surface de murs sévèrement affectés par l'eau et les sels apparaît aussi ne pas être une protection assez forte »

• *Ethyle silicate et traitement de l'humidité :*

L'évaluation précédente de l'efficacité des traitements à l'éthyle silicate serait réductrice sans rapporter le propos de **Giacomo Chiari** (1993) sur des expérimentations réalisées sur des vestiges archéologiques situés sous la place de la cathédrale de Feltre, région du Veneto, Italie, qui peuvent infirmer des conclusions antérieures. Cette expérimentation de consolidation a porté sur un matériau en condition de forte humidité, bien qu'aucun film d'eau n'était visible en surface. Le traitement a été appliqué en Juin 1991, avec un durcisseur *Wacker OH*, à raison de 4 - 5 litres par m². Dans les deux mois qui ont suivi, on a pu observer un développement extraordinaire de champignons blancs, plus important sur les parties traitées que non traitées. Après quelques mois, une fois morts, ces champignons purent être facilement éliminés par simple brossage. L'explication donnée par G. Chiari à cette apparition de champignons est que lors de la première phase de réaction au traitement à l'éthyle silicate (hydrolyse), le pH décroît et crée un environnement plus acide qui peut être favorable aux types de champignons qui se sont développés. Par la suite, ces champignons ne sont pas réapparus mais Chiari observe que l'installation d'une climatisation pourrait avoir joué un rôle bien qu'il serait nécessaire d'étudier plus avant cette hypothèse. Ce premier traitement test ayant été considéré satisfaisant, une deuxième étape fut engagée en novembre 1991, sous des conditions de température et d'humidité différentes, et en changeant de produit consolidant, soit du *Monsanto Silvester ZNS* dilué à 1 : 1 dans de l'alcool éthyle, sans solvant catalyseur. La quantité de produit fut aussi diminuée (1 litre par m²), par rapport à la première expérimentation. Puis en septembre 1992, il fut décidé de traiter toute la surface avec le même produit mais en quantité doublée (2 litres par m²). Chiari observe que ce traitement a trouvé une « bonne consistance, indiquant encore que le produit n'a pas strictement besoin de la présence de groupes hydroxyles (OH⁻) pour que la réaction de consolidation s'opère et qu'il marche bien avec de nombreux matériaux, qui, apparemment, ne contiennent pas de groupes OH⁻ ». Chiari peut donc affirmer que le traitement à l'éthyle silicate a prouvé son efficacité bien que les conditions humides au moment de l'application étaient élevées. Discutant les expérimentations réalisées à Grenoble, sur des murs-souterrains, mais à l'état sec, exposés à un climat aux précipitations marquées (pluie, neige, gel) - se reporter à M. Dayre et E. Kenmogné, 1993, précédemment cités -, G. Chiari confirme à nouveau l'intérêt de ce type de traitement qui peut être adapté à un plus vaste registre de conditions d'humidité des matériaux. Cependant, il convient de rappeler que les matériaux traités ne doivent pas opérer de fissuration au risque de favoriser l'infiltration et donc de réduire considérablement l'efficacité de ce type de traitement. Nous retrouvons ici la question de la protection des sommets de mur par « *capping* », avec des matériaux compatibles qui doivent, justement, ne pas fissurer. La question de l'interrelation des éléments d'un système construit à traiter, et des facteurs d'environnement est à nouveau soulevée.

• *Autres expériences comparées et discutées*

Dans sa thèse présentée à l'Université Columbia, plusieurs fois référencée, **Pamela Stacy Jerome**, (1991), développe un chapitre sur la technologie de la conservation où elle évoque la consolidation à l'aide de résines synthétiques qui, selon elle, ne sont pas du tout adaptées pour la brique crue. Mais, elle relève l'intérêt des esters de silice permettant de maintenir la porosité originale alors que des ponts de silice sont générés dans la matrice du matériau. Ce traitement contribue à améliorer la résistance à l'eau et, bien qu'irréversible, son application peut être considérée comme acceptable dans la mesure où il conserve la porosité initiale. Mais, ne contribuant pas à améliorer les propriétés de cohésion, l'auteur conseille d'appliquer ce type de traitement juste après les fouilles, avant que ne s'opère le processus de dégradation. P.S. Jerome note également que ces traitements à base d'éthyle silicate, de résine PVAC et acrylique, réagissent différemment selon les types d'argile. Elle rappelle l'exemple des expériences réalisées sur le site de Fort Selden, USA, que l'on a précédemment citées, où les silanes se sont avérés plus performants pour consolider des kaolinites alors que les isocyanates ont réagi plus favorablement sur des montmorillonites.

L'auteur rappelle que le site de Séleucie a été le premier où une consolidation chimique à l'éthyle silicate a été réalisée à grande échelle, par aspersion, en 1969 (cf. G. Chiari, *supra*). D'autres expériences satisfaisantes ont été par suite réalisées en Sicile (1971), à Garagay (1975), à Chan Chan, Pérou et en Equateur (1980), en Arabie Saoudite et en Jordanie (1980). Citant G. Chiari (1987), P.S. Jerome précise à nouveau que l'éthyle silicate conserve au matériau sa porosité originale tout en assurant une résistance à l'eau et que l'on peut envisager de nouvelles applications. Ces observations déduites d'analyse en SEM n'oblitérent pas le fait que la réaction du produit est extrêmement lente, sur une période de plusieurs mois, et peut-être même sur plusieurs années. Ainsi, selon G. Chiari, cité par P.S. Jerome, « Si après la cure, le résidu chimique (...) continue à se modifier pendant plusieurs années, on peut avoir des doutes sur une perte de l'effet consolidant et durcissant ». Chiari croit que « le revêtement résiduel et le nombre important de ponts formés (entre les particules) au niveau atomique » sont à même de créer les liens chimiques entre la terre et l'éthyle silicate.

Se référant également à Lewin et Schwartzbaum (1985), à propos d'expériences de consolidation réalisées en Jordanie avec du *Wacker H* (durcisseur de pierre), dilué dans du toluène, P.S. Jerome rappelle que le processus « d'hydrolyse continue à agir pendant longtemps (...) et qu'il n'y a pas de raisons cependant, si l'effet consolidant s'affaiblit et se dissipe sur une durée prolongée du fait des réactions hydrolithiques, que le résidu qui demeure dans les briques de terre ne réagisse pas avec une réintroduction d'esters de silice pour réactiver l'effet consolidant. »

P.S. Jerome rapporte aussi des observations qu'elle a faite sur un site chypriote (Kalavassos-Tenta), à propos d'un traitement au *Mowolith*, une émulsion de PVAC, appliquée 10 ans auparavant, donnant aux briques une apparence plastifiée. Par ailleurs, ces vestiges ayant été recouverts d'un abri, les fragments exposés en bordure témoignaient d'une exfoliation très sérieuse résultant d'une pénétration de l'humidité à l'interface.

Quant à l'expérience réalisée sur le site Chimú de Chan Chan, au Pérou, par G. Chiari, en 1975 (Casa Velarde), ses effets semblent avoir été probants jusqu'en 1978. Mais de sérieux problèmes ont été repérés par A.M. Hoyle à Chan Chan

(voir par la suite), sur les frises ayant subi un traitement chimique, résultant de l'imperméabilité du matériau qui retient l'humidité à l'intérieur et réagit avec les sels, causant une exfoliation de surface. Ces expériences antérieures à l'éthyle silicate ont été remplacées par un nouveau traitement aux extraits d'une plante connue sous le nom de « *mucílago de tuna* ». Les esters d'acide sulfurique dans la « *tuna* » sont insolubles dans l'eau mais permettent d'obtenir une solution visqueuse qui agit comme un consolidant, doté de propriétés agglutinantes et plastiques, qui ne cause aucune altération au matériau bien qu'il exige de fréquentes réfections.

Pamela S. Jerome rapporte également d'autres expériences de consolidation chimique réalisées en URSS sur les forteresses de Erebooni et de Teishebaini. Ces expériences conduites sur des échantillons ont utilisé du verre soluble avec du fluosilicate de sodium, du silicate silicoorganique (une résine obtenue à partir de verre soluble et de tétraoxysilane), des résines époxy et polyester. Des efflorescences sont inévitablement apparues après l'imprégnation au verre soluble, alors qu'elle sont éliminées en surface avec les résines époxy et polyester, tout en demeurant dessous la surface et causant un écaillage à cause de l'imperméabilité du revêtement. C'est la solution silicoorganique qui a donné les meilleurs résultats.

Rapportant les expériences réalisées sur le site de « *Olivas Adobe* », en Californie, P.S. Jerome note que les meilleurs résultats ont été obtenus avec du polysocyanate basé sur des pré-polymères d'hexaméthylène diisocyanate. De même ont été expérimentés des traitements à l'éthyle silicate, au méthyle triméthoxysilane, à la résine silicone (*Dri Film 104*), au méthyle méthacrylate polymérisé *in situ*, et à l'*Acryloid (Paraloid) B-72*. Selon les chercheurs, le préservatif chimique idéal doit présenter une faible viscosité, ne pas utiliser d'eau comme médium de transport et agir comme consolidant en conférant une résistance mécanique et à l'abrasion. Il doit retenir la porosité du matériau, former une couche de transition progressive, incorporer une résistance aux sels, doit être hydrolithiquement inerte et photolithiquement stable. Il doit être réversible et maintenir les propriétés optiques originales, présenter un coefficient thermique similaire, être peu coûteux et sans danger. Les auteurs considèrent que la polymérisation *in situ* est essentielle pour garantir une pénétration en profondeur. Cela représente en effet une somme importante de comportements et de propriétés à réunir (reprise des arguments de G. Chiari, cf. *supra*).

La pénétration des consolidants chimiques est directement liée au type de solvant utilisé pour leur migration dans le matériau, préférablement de faible viscosité, mais dépend aussi de la « nature physique du réseau capillaire, principalement quant à la forme et la dimension des tubes capillaires ». Elle « dépend aussi du comportement des argiles face au climat et de leur réactivité ». Il existe trois types de solvants utilisés pour la préservation des adobes. L'eau, le kérosène et les spirits minéraux, qui présentent une évaporation lente, et les solvants organiques caractérisés par une évaporation rapide comme le toluène, le xylène, l'acétone, etc. L'eau n'est pas recommandée car l'argile gonfle en sa présence et les pores se ferment, empêchant la pénétration du produit. Généralement ce sont les produits du second type qui sont préférés comme solvants car ils pénètrent de manière homogène et tendent à déposer le consolidant dans les pores, donnant aussi du temps pour la cure chimique avant évaporation du solvant. Les solvants du troisième type résultent souvent en une migration rétroactive vers la surface du matériau lorsque le solvant s'évapore. Mais, P.S. Jerome note qu'il est toutefois difficile et onéreux d'assurer une pénétration générale du produit. Il est donc

invariablement indispensable que les éléments traités soient protégés du climat pour ne pas permettre une pénétration de l'humidité à l'interface, et qu'ils soient également protégés de la dégradation due au rayonnement UV.

III.13.5. - Efficacité de la stabilisation chimique des enduits sur murs d'adobe ?

Charles Selwitz et Thomas J. Caperton, ont récemment présenté dans un article (1995), les tentatives de création d'une forme plus durable d'enduit conventionnel sur maçonnerie d'adobe. Le programme concerne la restauration du « *Montaño Store* », un bâtiment historique localisé à Lincoln, Nouveau Mexique, et a été entrepris en 1995. Sur ce bâtiment, un enduit au ciment avait remplacé un enduit plus ancien en terre, 60 ans auparavant, lequel n'a pas tenu. Il a été remplacé par un enduit en terre modifié par ajout de polymère en solution aqueuse et traité avec un hydrophobant du type polysiloxane, également en solution aqueuse. Selon les auteurs, le produit est resté inchangé après deux années d'exposition mais il serait nécessaire, d'effectuer un « monitoring » sur une période plus longue de 8 à 9 ans pour garantir l'efficacité du traitement et préciser les conditions d'entretien.

Les auteurs rappellent les développements historiques des pratiques de consolidation de l'adobe. Ils évoquent les travaux pionniers de G. Chiari et de Darrel Butterbaugh en Iran, dans les années 70 que l'on précédemment référencés. Ils référencent également les travaux de M. R. Taylor (1990, in Conférence Adobe'90), qui ont permis d'examiner un large éventail d'acryliques en dispersion et qui concluaient sur l'intérêt d'un produit, le RE-330 que l'on a *supra* évoqué. Mais également les recherches menées dans le cadre du programme de Fort Selden III sous contrôle de Charles Selwitz, Richard Coffman et Neville Agnew (1990, *supra* cité), concluant sur le fait que les alkoxysilanes comme les éthyles silicates, et particulièrement le méthyletriéthoxysilane, maintiennent un transfert de l'humidité tout en renforçant les parois d'adobe, sans fissuration ni délamination. D'autres travaux ultérieurs montrent que le poly(éthyle silicate) est plus approprié car moins coûteux, plus évaporant et plus durcissant pour des dosages inférieurs. Les recherches menées par le GCI montrent en général que le traitement final du matériau au polysiloxane en solution aqueuse donne de meilleurs résultats.

C'est donc sur ces bases que Charles Selwitz et Thomas J. Caperton ont défini leur expérimentation visant à utiliser des enduits en terre stabilisée chimiquement mais dont l'apparence serait comparable aux enduits de terre traditionnels, tout en offrant une meilleure durabilité. Les murs du bâtiment traité seraient d'abord consolidés puis revêtus d'un enduit stabilisé et enfin recouverts d'un hydrophobant appliqué par aspersion. Le procédé a été appliqué après avoir enlevé l'enduit au ciment, sans causer de grosses dégradations aux murs d'adobe, et a été testé en trois étapes, sur une portion de mur (angle sud-est). D'abord la réparation des dommages causés à la maçonnerie d'adobe, en changeant les matériaux détériorés ou en bouchant les lacunes par de nouvelles adobes, puis en brossant la maçonnerie de façon à éliminer tout matériau pulvérulent et en réalisant des stries qui faciliteront l'accrochage de la première couche d'enduit. Le mortier de terre utilisé présente une texture granulaire de sable, limon et argile, dans une proportion idéale de 60 : 20 : 20. En effet des essais avec un rapport de composants granulaires de 1 : 1 : 1, stabilisés chimiquement, a montré des fissurations au séchage. Les stabilisants chimiques utilisés ont été des produits localement disponibles comme une émulsion de type « *Dow Corning* » (consolidant acrylique), et des produits basés sur le RE-330 de Rohm et Haas, comparable au « *El Rey Superior 200* »

et donnant des résultats similaires selon des expérimentations antérieures connues. Une concentration à 54 % de solides dans l'émulsion commerciale fournit une solution à 10 %. Le mortier a été préparé avec un malaxeur. Cet enduit utilisé en première couche a été appliqué sur le mur d'adobe humidifié et sa cure de séchage a été suivie de façon à l'humidifier à nouveau de temps à autres, pour éviter la fissuration. Lors de l'apparition de fissures, celles-ci ont été aspergées à l'émulsion polymérique à 10 % et les fissures ont été refermées à la truelle. L'enduit a été laissé à sécher pendant deux semaines, puis traité par aspersion avec le produit hydrophobe, du poly(méthylehydrosiloxane) de la firme « *El Rey Stucco* » d'Albuquerque, Nouveau Mexique ; le produit est dilué dans des spirits minéraux à 10 %. Les auteurs comparent le traitement réalisé à une intervention traditionnelle et relèvent qu'il ne prend guère plus de temps. Des parties de l'aire traitée ont reçu un traitement complémentaire à base de *Silbond 40*, un produit qui contient 70 % d'éthyle silicate polymérisé, 27 % d'éthyle silicate et 3 % d'éthanol ; une autre partie s'est vue traitée avec le même produit ajouté de poly(méthylehydrosiloxane).

Deux années après, l'enduit restait ferme et non fissuré comme il apparaissait après séchage, en 1993. Mais davantage de contrôle doit être fait sur une plus longue période d'exposition.

III.13.6. – Un programme d'essais comparant l'efficacité des copolymères, des émulsions acryliques et bitumineuse, du jus d'agave et du mortier de terre-paille

Le projet de réalisation de murs-tests à Fort Selden (New Mexico, USA), se donnait pour objectif de suivre et d'évaluer la résistance à l'érosion de divers types d'enduits appliqués sur des murets en briques d'adobe, mais également les remontées capillaires à la base des murs et la résistance à l'impact des précipitations. Ce projet qui a démarré en 1985 a fait l'objet d'un « monitoring » jusqu'en 1995. Deux années après le lancement du programme, soit en 1987, **Michael Romero Taylor** effectuait un deuxième rapport annuel qui nous restitue un ensemble d'informations utiles à une évaluation comparée de différents traitements.

• Rappel de présentation du programme

L'ensemble du programme prévoyait de tester deux murs en adobes non stabilisées bâties au mortier de terre non stabilisée, d'une longueur de 19.81 mètres, d'une hauteur de 1.52 mètre et de 35.4 cm d'épaisseur. L'un des deux murs test est orienté selon l'axe nord/sud et l'autre selon l'axe est/ouest. Chacun des parements des murs est divisé en 13 panneaux de 1.52 mètre de large, dont 12 panneaux avec des enduits amendés de divers produits chimiques et 1 panneau non amendé qui sert de contrôle. Les quatre faces sont les mêmes, ainsi que leur sommets, et l'on a donc ainsi un ensemble de 12 panneaux d'expérimentation ajoutés d'un panneau de contrôle, pour chacune des orientations cardinales. On peut donc évaluer pour chaque façade les effets des conditions climatiques et de l'ensoleillement. Les amendements en produits ont été soit mélangés au mortier d'enduit soit appliqués par aspersion ou au rouleau à peinture, en trois couches, pour une épaisseur totale de 2.54 cm. Chaque panneau correspondant à un mélange spécifique de mortier amendé est divisé en deux, verticalement, avec d'une part un dosage à 5 % et l'autre à 10 % de produit chimique utilisé. Il s'agit ainsi de pouvoir préciser, pour des dosages similaires de différents produits quel est le meilleur rapport d'efficacité et de coût.

Les produits utilisés sont les suivants :

- deux copolymères acryliques, du « *El Rey Superior 200* » et du « *Soil Seal Concentrate* » ;
- une émulsion acrylique, du « *Daraweld-C* » ;
- une émulsion bitumineuse ;
- un extrait de jus d'agave (cactus) ;
- un mortier de terre et de paille.

Les critères d'érosion évalués au terme de 24 mois d'exposition, selon les différentes expositions cardinales (nord/sud/est/ouest), sont les suivants :

- très peu d'érosion ;
- peu d'érosion ;
- érosion modérée ;
- érosion sérieuse ;
- érosion très sérieuse.

• Résultats à 24 mois pour les murets enduits amendés par ajout de produits au mélange du mortier.

- **Le « *El Rey Superior 200* »**, un modificateur acrylique utilisé dans l'industrie du béton est une résine de méthylméthacrylate/acrylate à 47 % de solides dans l'eau. Cette expérience vient compléter d'autres expériences réalisées avec d'autres produits de la même gamme comme les « *Rhoplex MC-76* » et « *Rhoplex E-330* » (voir *supra*), expériences menées sur divers sites du sud-ouest des USA depuis quelques années. Après 24 mois, ce produit confirme très peu, à peu d'érosion, pour les quatre orientations cardinales, avec une érosion plus évidente pour le dosage à 5 % qu'à 10 %. Ce produit assombri la coloration du mortier dans les premiers 6 mois, puis cette évolution de la couleur se stabilise.

- **Le « *Soil Seal Concentrate* »** est un stabilisant des sols pour améliorer leur résistance à l'érosion. Il est composé principalement à base de copolymères latex acryliques équilibrés, préparés sous forme d'émulsion aqueuse appliquée par aspersion. Il consiste en 40 % de méthacrylates et d'acrylates, 1 % d'éthanol poly (éthoxylaté) et de 3.5 % de silicates. Il est dilué à 46 % de solides dans l'eau. Après 24 mois, ce produit confirme peu d'érosion, à une érosion modérée, et les dosages à 5 % présentent une érosion légèrement supérieure.

- **Le « *Daraweld-C* »** est une résine hautement polymérisée à 51 % de solides dans l'eau, utilisée comme agent de prise pour le béton. Après 24 mois, ce produit présente très peu d'érosion. Les dosages à 5 % présentent une érosion plus rapide et la coloration est notoirement assombrie pour les dosages à 10 % (vérifié à l'étalonnage de la Charte de coloration Munsell).

- **L'émulsion bitumineuse** est un produit dérivé du pétrole, largement utilisée dans la production des briques d'adobe comme stabilisant, aux USA, mais aussi utilisée depuis la lointaine antiquité au Proche-Orient. Après 24 mois, les panneaux enduits au mortier amendé en émulsion bitumineuse présentent peu d'érosion. Mais la coloration a viré au très sombre sans qu'il y ait de différence notoire entre les dosages à 5 % et à 10 %. L'érosion est plus sensible pour les faibles dosages.

- **Le jus d'agave** a été extrait des feuilles de cette variété de cactus en les faisant bouillir et en pilant la pulpe. L'extrait non dilué a été laissé au repos pendant deux à trois semaines avant application. La seule différence avec les autres produits c'est que les deux premières couches d'application de l'enduit

ont été non amendées, seule la couche de finition contenant du jus d'agave. Après 24 mois, ce produit a montré une érosion modérée (expositions nord et sud), à sérieuse (expositions est et ouest), avec peu de différence pour les deux dosages et aucun changement de coloration.

- **Le mortier de terre-paille** a été utilisé selon un mode très traditionnel, répondant au critère d'amélioration du retrait au séchage. Après 24 mois, on observe dans l'ensemble une érosion modérée, plus sérieuse pour l'orientation à l'est et surtout une érosion typique et plus sévère en partie haute des panneaux et sur les sommets. A l'exposition au nord, on observe également une dégradation complète de l'enduit de terre stabilisée à la paille dans la partie basse du panneau test, alors que pour les autres orientations, la partie basse n'a pratiquement pas été affectée. Il se peut que l'exposition nord ombragée avec accumulation de l'eau de pluie et de la neige, sans séchage, ait contribué à ce phénomène.

Discutant plus profondément les résultats obtenus, Michael Romero Taylor observe que les enduits consolidés par ajout de produit lors du mélange, soit dans leur masse, présentent une érosion inférieure vis à vis des panneaux qui reçoivent les produits par aspersion ou application au rouleau à peinture. De même, l'auteur relève que l'érosion (perte de matériau) est graduelle et uniforme, sur le plan vertical des panneaux. Sur les sommets, l'érosion est plus forte. Les dosages à 5 % se sont moins bien comportés que ceux à 10 % mais ces faibles dosages donnent une érosion d'apparence plus naturelle que les dosages plus forts qui donnent plus de rigidité au matériau. Les dosages à 10 % présentent plus de fissuration de retrait mais des couches plus fines et un meilleur contrôle de la cure de séchage pourraient certainement contribuer à mieux contrôler ce problème. Si le « *Rey Superior 200* » et de « *Daraweld-C* » présentent peu d'érosion, il convient de vérifier si des quantités d'humidité significatives ne sont pas piégées dans l'épaisseur du matériau car ce pourrait être un facteur important de la longévité du traitement. Les panneaux avec enduits amendés au « *Soil Seal Concentrate* » et à l'émulsion bitumineuse présentent davantage d'érosion mais se comportent relativement bien. Les panneaux traités au jus d'agave et au mortier de terre-paille présentent une érosion très supérieure. Enfin tous les produits, à l'exception du jus d'agave et de la paille, changent la coloration des mortiers.

• Résultats à 24 mois pour les panneaux sur lesquels les produits ont été appliqués par aspersion ou au rouleau à peinture

Comme les panneaux qui ont permis de tester des enduits amendés en produits, dans la masse, lors de la préparation des enduits, les panneaux qui ont été testés pour l'application des produits par aspersion et au rouleau à peinture, ont été aussi divisés en deux parties, selon un axe vertical. L'une de ces deux parties a été enduite en trois couches de mortier de terre non amendé et l'autre a été laissée non enduite. Les amendements chimiques ont donc été appliqués par aspersion ou au rouleau à peinture, sur les deux moitiés de chaque panneaux, à des dosages équivalents. Les amendements utilisés pour l'application par aspersion ont été soit une finition à base de ciment (« *Super Quickseal* »), une solution saline de matériau non organique (colle minérale pénétrante et durcissante *K & E*), de l'huile de lin, une résine de silicone (« *Silicote* »), et une émulsion acrylique (« *Seal-Krete* »). Pour les applications au rouleau, l'amendement est une émulsion acrylique (« *Thorocoat* »).

- **Le « Super Quickseal »** est un revêtement à base de ciment utilisé en finition des bétons ou des maçonneries. Il a été associé à l'utilisation d'un autre produit, « l'Acryl 60 », polymère acrylique et modificateur utilisé comme adjuvant au ciment Portland, pour améliorer son adhérence et ses propriétés mécaniques. L'Acryl 60 a été utilisé en 1^{ère} couche et le « Super Quickseal » en finition. Après 24 mois d'exposition cette combinaison des deux produits montre une érosion modérée sauf sur le sommet des panneaux tests où l'expérience a échoué. Avec l'apparition de fissures sur les parements verticaux, l'humidité s'est infiltrée et a contribué à accélérer l'érosion de la surface traitée. Une évolution de la coloration a été observée sur l'exposition sud après 1 an d'exposition.

- **La colle minérale pénétrante et durcissante K & E** est une solution de sels minéraux non organiques à 30 % de solides dans l'eau. Après 24 mois d'exposition, on observe une érosion modérée à sérieuse, voire très sérieuse, selon les expositions cardinales. Cette érosion se manifeste sous forme de grosses écailles. Pas de changement de coloration.

- **Le mélange d'huile de lin et de spirits minéraux (1 : 5)**, confirme une érosion sérieuse, à très sérieuse, après 24 mois, avec 50 % d'érosion sur la façade exposée à l'ouest. Léger assombrissement de la coloration.

- **Le slicote** est une résine silicone modifiée à 9.9 % de solides dans du xylène. Après 24 mois, on observe une érosion modérée, à sérieuse, surtout pour les expositions est et ouest. Cette érosion prend la forme d'écailles. Pas de changement notable de coloration.

- **Le « Seal-Krete »** est un composant acrylique utilisé pour imperméabiliser les enduits et la maçonnerie. Après 24 mois d'exposition on note une érosion modérée à sérieuse, sous forme d'écailles. Pas de changement notable de coloration.

- **Le « Thorocoat »** est un revêtement prêt à l'emploi, non cimenteux, à 100 % d'acrylique, (« ready-mixed non-cementitious 100 % acrylic textured coating »), utilisé en décoration ou en protection des surfaces intérieures et extérieures. Après 24 mois d'exposition, on observe une érosion faible à modérée (sauf d'autres érosions vraisemblablement dues à un tassement de la maçonnerie avec fissuration), et aucun changement de coloration.

En conclusion, Michael Romero Taylor relève que tous les produits testés par aspersion ou appliqués au rouleau à peinture ont dans l'ensemble assez mal fonctionné. Les détériorations, comme pour les produits rajoutés au mortier des enduits, commencent par le haut des panneaux exposés. De large écailles et épaufrures sont visibles sur les surfaces traitées par aspersion, par lesquelles l'eau s'infiltré et accentue le processus de détérioration. La pénétration des produits dans l'épaisseur du matériau est très réduite et comme le mur imperméabilisé ne peut évaporer l'humidité piégée, une exfoliation et un détachement des enduits sont très évidents. Il apparaît finalement que les enduits non amendés en produits chimiques résistent bien à l'érosion si ce n'est mieux que les enduits traités par aspersion. En effet, les panneaux de contrôle avec enduits de terre non amendé montrent après 24 mois d'exposition une érosion modérée, à sérieuse, avec principalement une détérioration sur les sommets et les bases des murs. De plus ce type d'érosion apparaît très rapidement, durant la première année et semble se stabiliser au cours de la deuxième année. Ainsi est à nouveau clairement posée la question de l'entretien préventif ou curatif périodique pour les solutions de protection

traditionnelles utilisées depuis des millénaires dans l'histoire de la construction humaine en terre.

III.13.7. – Une intervention « douce »

Il nous a semblé intéressant de terminer ce chapitre sur la consolidation chimique en évoquant une expérience italienne « contradictoire » qui prône l'intervention « douce ». Cela pour rappeler le principe « d'intervention minimale » et pour rappeler la nécessité de la compatibilité entre l'intervention de stabilisation structurale et les matériaux d'origine. Mais aussi pour remettre en lumière le débat sur la consolidation chimique.

Lors de la « 5^{ème} Réunion Internationale d'experts sur la conservation de l'architecture de terre », qui s'est tenue à Rome (ICCROM), en octobre 1987 (*supra* référencée), **Roberto Nardi** a présenté une intervention de conservation sur des structures médiévales en adobe et en briques cuites, bâties au mortier de terre. Il s'agit d'une structure semi-circulaire de 4.20 m de diamètre et de 0.80 m d'épaisseur, qui semble correspondre à un four, mais qui n'aurait jamais été utilisée (pas de trace d'induration). Cette structure a souffert de l'exposition aux agents atmosphériques et les pluies (impact et ruissellement), comme les vents (pression et abrasion), le soleil (déshydratation), comme les algues (détérioration physico-chimique), ont contribué à dissoudre la plupart du parement extérieur, le laissant quasiment sans forme. Des mesures de prévention ont été prises par les conservateurs, de façon à stopper les dommages et en vue de préparer une éventuelle restauration ultérieure, tout en permettant de continuer les recherches archéologiques.

Une toiture de protection temporaire, en acier et plastique, a été érigée pour pallier les effets de la pluie et du vent. Les végétaux superficiels qui pouvaient être arrachés l'ont été, sans extraire les racines qui pouvaient jouer un rôle utile de renforcement statique. Les algues ont été traitées par aspersion d'un biocide, du *Lito 3* (« *Ciba-Geigy* »). Pour traiter le problème de la déshydratation, qui doit être absolument contrôlé afin d'éviter la micro-fissuration et l'écaillage de la partie superficielle du matériau, son effritement et une cristallisation des sels par le fait de l'évaporation de l'humidité, l'abri en acier et plastique a été recouvert d'un cannisse de bambous. La structure étant ombragée on a alors procédé à une humidification du matériau à base d'eau déversée automatiquement, goutte à goutte. Le matériau a progressivement absorbé l'eau puis l'on a progressivement diminué la quantité d'eau jusqu'à désactiver l'installation. Cela a permis de maintenir un taux d'humidité suffisant durant les travaux de fouilles. « Jouer » avec l'eau ou se « blinder » contre l'eau ?

La préservation de la structure a privilégié des matériaux et des techniques aussi proches que possible des solutions originales, de façon à conserver l'intégrité des matériaux. C'est donc la terre argileuse locale, stabilisée à la chaux hydraulique Lafarge (10 %), peu saline, qui a été utilisée. Il a fallu reboucher les fissures et réintégrer les blocs d'adobe détachés des parois, tout en redonnant une bonne intégrité statique à la structure, puis garantir une protection de surface. Pour une consolidation interne des matériaux on a également réalisé des injections à base d'un mélange fluide de terre argileuse finement tamisée et de chaux hydraulique (9:1), avec autant d'eau que nécessaire pour obtenir la bonne fluidité, tout en conservant une coloration adaptée et une résistance similaire à celle du matériau original. Cette barbotine liquide a été injectée dans les fissures et sur les zones de matériaux détachés, préalablement traités à l'eau et à l'alcool. Les aiguilles des seringues, en plastique, ont été remplacées par des tubes en métal ou en polyuréthane de 3

mm de diamètre intérieur, et de 10 à 50 cm de longueur, selon la profondeur des situations à traiter. Des forages de 2 à 3 mm de diamètre ont été occasionnellement réalisés pour faciliter ces travaux de rebouchage des fissures ou des cavités. La réintégration des parties détachées a été opérée à l'aide d'une barbotine argileuse et les structures ont été étayées jusqu'au séchage. Les finitions ont été faites avec le même mélange de terre argileuse et de chaux, mais à un état plus plastique, et à la truelle, pour fermer les fissures en surface. Pour les consolidations visant à réintégrer l'équilibre statique de la structure, on a préféré employer des briques « semi-cuites », après avoir réalisé plusieurs tests de cuisson avec des terres argileuses différemment amendées en sable en souhaitant obtenir la coloration et la résistance souhaitée pour un aspect aussi proche que possible des matériaux d'origine, en forme, comme en couleur, mais aussi en résistance à l'eau. Tout a été correctement documenté de façon à éviter tout risque de falsification. Cette réintégration structurale était nécessaire pour maintenir la structure en place et pour lui procurer une protection extérieure imperméable. Finalement, quelques problèmes de coloration à la cuisson des briques au-delà des 400 ° C nécessaires pour garantir une imperméabilisation des argiles, ont permis de distinguer très clairement les parties réintégrées, des parties originales. La protection de surface a été aussi réalisée avec une intervention légère en aspergeant une solution très liquide de lait de chaux et d'argile tamisée. Cette protection est totalement réversible et fonctionne comme un badigeon sacrificiel où les sels solubles auront aussi tendance à migrer et à cristalliser. Après avoir nettoyé les sels sur une partie de la structure érigée à même le sol qui pouvait être plus exposée à des remontées capillaires, on a pu constater que le phénomène de cristallisation n'est pas réapparu après 24 mois, de manière substantielle. Roberto Nardi, relève en conclusion que même une intervention « légère » peut donner des résultats importants et sans en appeler à l'emploi de produits synthétiques. Selon lui, les conservateurs n'ont pas à redouter ou à être honteux de ne pas être des « techniciens pointus » et il convient bien de faire la différence entre la « conservation » et la « transformation ». Pour cela, il faudrait sans doute mieux prendre en compte les pratiques de soin et d'entretien qui font partie de notre héritage culturel.

III.13.8. - L'amélioration des pratiques traditionnelles : jusqu'où ?

Dans un rapport d'évaluation des travaux de conservation et de valorisation touristique qui ont été conduits sur le site de Ebla, Syrie, sous la direction du Professeur Paolo Matthiae, le Docteur **Ugo Capriani** (1998), dresse un bilan, en forme d'évaluation qui a retenu toute notre attention. L'auteur pose d'entrée la question de la vérification des « techniques de restauration variées » en rappelant comme principe fondamental « qu'il est nécessaire d'adopter des méthodologies simples et des matériaux si possible typiques, dont les coûts et la difficulté d'utilisation en permettent un usage étendu tout en ayant une main d'œuvre locale non spécialisée ». Il poursuit en déclarant que « les techniques raffinées de la restauration italienne nous ont tout de suite semblées inapplicables et superflues en plus d'être onéreuses ». Ainsi, « en se confrontant à la main d'œuvre locale on a déduit des données sur les techniques et sur les matériaux traditionnels qui, convenablement améliorés et corrigés, ont fourni un point de départ en ce qui concerne les méthodologies élaborées des interventions ».

Sur la base des expériences antérieures de conservation déjà connues, U. Capriani relève que : « les produits très efficaces comme les éthyliques silicates sont très chers et difficile à utiliser » ;

- les autres, comme les émulsions acryliques, si elles sont utilisées correctement, donnent de très bons résultats à des prix convenables, mais cela demande un entretien périodique ;
- le ciment blanc (trouvable facilement sur place), ajouté au mortier traditionnel donne des résultats intéressants ».

Mais « chaque problème exige sa propre solution ». En tout cas, « une simple restauration s'avérerait inadéquate si elle n'était pas associée à un entretien général et continu ainsi qu'à une valorisation des monuments :

- élimination systématique des mauvaises herbes ;
- contrôle de l'écoulement des eaux de pluie ;
- contrôle des parcours de visite et des mesures de sécurité pour les sites et les touristes ;
- enlèvement des déchets apportés par le vent et par les touristes ;
- etc.

U. Capriani rappelle les expérimentations qui ont été réalisées sur le site de Ebla en 1995-96.

- une phase d'étude documentaire sur la littérature couvrant la question de la conservation de la terre crue (actes des principales conférences internationales) ;
- études des matériaux et techniques *in situ* ;
- expérimentations à l'aide d'éthyle silicate par application à la brosse sur les maçonneries et les sols, et d'émulsion acrylique en solution aqueuse à 5 %, par aspersion sur les murs, et application à la brosse sur les sols.
- application à la truelle et en couche fine (- de 3 mm) ou épaisse (5-10 mm), d'un enduit sacrificiel à base de plâtre mélangé à la terre, préparé en mélange de poussière de calcaire, paille résine acrylique et ciment blanc ;
- application de « *scialbo* » ou plâtre liquide, au pinceau.

U. Capriani note que « deux ans après (...) seuls les essais de consolidation chimique des sols ont donné des résultats satisfaisants alors que des croûtes compactes se sont formées sur les murs puis sont tombées ». De même, « seul l'essai au *scialbo* a donné des résultats satisfaisants alors que l'enduit sacrificiel de plâtre s'est séparé des briques et est en partie tombé ». Mais, la consolidation des soubassements en pierre à l'aide de mortier de ciment blanc, terre et calcaire a donné d'excellents résultats.

Ces expérimentations de 1996 ont été évaluées pour étudier les corrections à faire. Diverses nouvelles interventions ont été prévues dans le Palais Septentrional (Aire P) dont :

- la consolidation des soubassements en pierre au mortier de terre, ciment blanc et calcaire ;
- la reconstruction de cloisons de maçonneries en briques crues pouvant être différenciées des briques originales ;
- la mise en place de système de drainage ;
- la protection des maçonneries à l'aide d'un enduit de plâtre (*scialbo*) sacrificiel, avec des modes d'application et des épaisseurs de couches différenciées pour une évaluation ultérieure ;
- la consolidation de morceaux de sols à l'émulsion acrylique ;
- la consolidation de morceaux de plâtre d'origine avec des injections d'acryliques ;
- d'autres interventions de restauration concomitantes aux fouilles, tels que consolidations d'ouvrages et d'objets présents dans la salle du trône, jarres et orthostates, sols en terre battue.

De nouvelles expérimentations ont visé à améliorer la préparation du plâtre traditionnel, *Tin*, à base de calcaire, terre et paille, et gâchage avec une solution aqueuse d'acrylique à 5 %. Mais aussi à préparer une meilleure adhérence de ce *Tin*, en réalisant un travail de nettoyage des murs par désherbage, ainsi que pour les fossés périmétriques du monument.

L'année 1998 a été une année de « monitoring » et de révision des interventions effectuées les années précédentes. Des modifications aux techniques et aux matériaux ont pu être apportées :

- « *scialbo* » ajouté de paille finement coupée et une consolidation à l'acrylique.

De plus, U. Capriani relève que l'« on a développé quelques considérations techniques et philosophiques :

- les systèmes les plus simples et les plus pauvres ont donné de meilleurs résultats ;

- la consolidation ou le « *scialbo* » doivent être appliqués sur des surfaces récemment découvertes, car après un an d'exposition, les briques sont difficilement récupérables ;

- la nécessité d'identifier des priorités notoires telles que fissures , sols et enduits à stabiliser, sur des zones « fenêtres » qui seront valorisées alors que les autres zones recevront un traitement plus simple et moins coûteux ;

En conclusion, Ugo Capriani relève que « ce que nous avons initialement défini pragmatisme de chantier nous a conduit à quelques résultats que nous retenons positifs et qui nous permettent de nous projeter dans le futur, (...) en étant conscients de pouvoir (...) conserver une bonne partie des extraordinaires structures monumentales d'Ebla. »

Et pourtant, parmi les solutions retenues par U. Capriani, résultant de cette expérimentation pragmatique, on doit relever que plusieurs risquent de poser des problèmes à long terme. La porosité et la perméabilité de l'enduit au « scialbo » consolidé à l'acrylique devrait être davantage évaluée au risque de voir des problèmes liés à l'humidité piégée par une texture trop fermée. La proposition d'une « consolidation des parties les plus importantes de maçonneries par le biais de continues injections d'éthyle silicate ou de résine acrylique avec des dizaines d'aiguilles reliées à des réservoirs placés à différents niveaux pour mettre sous pression la partie consolidée », risque d'être très coûteuse et donc de contredire les intentions initiales de recherche d'économie. La « consolidation des murs de fouilles par le biais de maçonneries en briques à base de ciment et la création de trottoirs et de plates-formes à usage touristiques, aggravera certainement les problèmes d'humidité à la base des murs en adobe (pas d'évaporation d'éventuelles remontées capillaires piégées dans l'épaisseur des murs et à leur base). On aura aussi relevé une proposition de reprise des fissures avec des matériaux incompatibles (harpes en rond de béton armé fixées dans les briques). Ou encore, la dissimulation des matériaux originaux par un emploi trop généralisé d'un enduit consolidé de « scialbo » ou de « Tin », en enrobage. Les bonnes intentions initiales fondant cette démarche d'intervention valorisant « l'amélioration des techniques traditionnelles locales » ne sont-elles pas contredites par les choix de traitement ?

III.14. – La conservation des surfaces décorées sur structures en terre

La question de la conservation des surfaces décorées sur des murs-supports en terre mobilise les conservateurs, dans les faits du travail de terrain, depuis plusieurs années et cela sous des latitudes géographiques variées. Mais, la littérature scientifique, au-delà des expérimentations les plus connues couvrant la consolidation à base d'éthyle silicate (G. Chiari), ne semble commencer à développer plus largement le propos, dans sa spécificité, qu'à partir de la fin des années 80 et surtout au cours de ces années 90. Nous avons ainsi repéré diverses contributions qui montrent combien cette question est affaire de spécialistes « pointus », d'utilisation de techniques précises - ré-attachement par « grouting », détachement et réintégration ou anastylose -, voire sophistiquées ou « précieuses ». Pour autant, la position théorique des conservateurs est clairement guidée par le concept d'intervention minimale. On a pu aussi repérer quelques rares contributions d'auteurs qui, sur la base d'une recherche scientifique poussée et d'une expérience de terrain assurée et évaluée, commencent à développer un propos théorique.

III.14.1. - Ré-attachement et « grouting »

A propos des traitements de conservation qui ont été développés sur le site d'Aztec aux USA, **Constance S. Silver** (1990) évoque l'utilisation de divers produits pour le ré-attachement des enduits et peintures des pièces 117 et 156. Le niveau de dégradation des peintures murales blanches est alors évalué à 70 %, alors que les peintures rouges semblent avoir été revêtues d'une sorte de résine et montre un détachement de la couche d'enduit préliminaire, de l'ordre de 80 % avec une perte considérable. Une partie de ces peintures murales très dégradée a été utilisée pour des essais de traitements de conservation. Les peintures rouges ont été traitées en premier avec, application d'un tissu humidifié à l'eau de source. Puis un mélange de 50/50 d'eau de source et d'alcool isopropyle a été aspergé sur le tissu, pour hydrater de nouveau l'enduit et restaurer sa cohésion, ainsi que son adhérence à la couche préliminaire. Ce traitement a été opéré trois fois car les écailles conservaient leur distorsion et se détachaient après le premier jour de traitement. Les parties détachées de la couche d'enduit de préparation, ont été traitées à l'état humide avec une injection de mélange d'eau de source et d'alcool isopropyle (50/50), suivie d'une injection de *Rhoplex AC 33* dilué à 50 % dans de l'eau. La partie traitée a été remise en contact avec le mur par léger pressage. Les bords fragiles et instables ont été fixés de nouveau avec une barbotine de terre (« adobe filler »).

Développant son propos, Constance A. Silver précise la procédure qui a été adoptée pour stabiliser les peintures murales sur les pueblos du Sud-ouest, et garantir leur adhérence au support d'enduit. En considérant le comportement rhéologique de l'enduit et de la peinture, il est apparu évident que l'eau serait le matériau le plus efficace pour un traitement de conservation, car elle peut permettre de redonner une plasticité au matériau effrité et déformé en favorisant un nouveau compactage, et en redonnant de la cohésion au matériau, tout en permettant de le fixer à nouveau dans le plan du mur. En résumant la procédure adoptée, Constance A. Silver évoque plusieurs étapes de travail successives.

1 - l'utilisation d'un papier japonais, appliqué sur la surface de l'enduit, sur les parties peintes et non peintes, mouillé à l'eau appliquée à la brosse. Ce papier agit comme support et protège l'enduit. Les zones traitées sont humidifiées au spray d'eau jusqu'à ce que l'enduit devienne malléable.

2 - Un mélange d'eau et d'alcool isopropyle (50 : 50), est ensuite injecté comme agent d'humidification adhésif, entre l'enduit et le mur. Une émulsion d'acétate polyvinylique, solide à 25 %, est injectée sur les zones de détachement, entre l'enduit et le mur, et entre les deux couches d'enduit. Ainsi cet adhésif n'est jamais en contact avec les fragments de peinture murale.

3 - Les zones traitées sont ensuite légèrement compressées, dans le plan du mur, en exerçant des petites pressions locales de manière à redonner de la cohésion et à rétablir un contact continu entre la peinture, l'enduit et le mur. Cela en conservant le papier japonais permettant de visualiser la peinture murale durant le traitement.

4 - De simples presses sont confectionnées à partir de plaques de contre-plaqué maintenues en contact avec les zones traitées, avec des étais et des pierres, et exerçant une légère pression durant la cure humide, pendant 48 heures.

5 - Après séchage, le papier japonais est ôté. Un peu de poussière reste accrochée mais la peinture et l'enduit n'en sont pas affectés. Les parties traitées ont retrouvé leur unité de cohésion avec le mur.

6 - Quelques parties instables de peinture, qui ont pu demeurer, ont été traitées par une application d'Acryloid B 72, dosé à 8 % dans du toluène. Des applications répétées d'acétone permettent d'évacuer des résidus de surface mais on observe un changement de la qualité visuelle qui est d'autant plus évident que la zone traitée est large.

7 - Une zone très friable a été traitée avec du *Tegovakon T (R)*, un alkoxysilane. Mais ce sont les produits du type *Conservare OH (R)* et *Conservare H (R)* ont donné les meilleurs résultats.

A propos du programme de conservation des enduits architectoniques de « *Fort Union National Monument* », Nouveau Mexique, USA, entrepris sur le site en 1991, puis en laboratoire entre 1992-93, F. Matero (1995), décrit les traitements qui ont été réalisés pour ré-attacher les enduits, les nettoyer et fixer à nouveau les restaurations antérieures. Plusieurs types de traitements ont été entrepris. Au-delà de l'aspect descriptif, cette contribution de F. Matero, très claire, fournit des éléments utiles à la formulation d'un propos de nature théorique.

• **Stabilisation temporaire**

Pour des fragments d'enduits instables, écaillés, fissurés ou détachés, des voiles de surface temporaires ont été appliqués, avant de détacher les fragments de restaurations antérieures, et de réaliser les injections de barbotine de ré-attachement. Selon la taille des fragments traités, le matériau constituant ce voile de surface a pu être soit un tissu à haute résistance à l'humidité, soit des gazes de coton pour les plus gros fragments. Ces voiles ont été fixés avec une solution d'alcool polyvinylique dilué à l'eau. Ils peuvent être facilement ôtés, à l'eau, 24 heures après avoir injecté la barbotine de ré-attachement. Mais ils sont indispensables pour soutenir temporairement les fragments fraîchement ré-attachés ou pour des fragments d'enduits qui exigent une pré-humidification plus importante, de façon à garantir leur maintien en place.

• **Consolidation**

Les peintures en état de pulvéulence ont été consolidées par application de trois couches de 3-5 % (w/v) de solutions d'*Acryloids B-72* dilué dans un mélange de toluène et de xylène (1 : 1), passé à la brosse sur un voile de protection de tissu hautement résistant à l'humidité. Cette technique est apparue la meilleure car les peintures pulvérulentes ont pu être consolidées

sans entraîner aucun changement visible de leur couleur, de leur texture ou de leur lustre et permettant de réaliser leur ré-attachement sans risque de détérioration.

• **Barbotine de ré-attachement**

La technique du « *grouting* » consiste à injecter des mortiers fluides ou adhésifs de façon à combler les vides indésirables et à faire à nouveau adhérer les matériaux détachés. Cette technique est recommandée pour rétablir une adhérence structurale entre les couches d'enduits et/ou leurs substrats, ou pour faire à nouveau adhérer une maçonnerie exfoliée. Les mortiers de « *grouting* » doivent être mécaniquement et chimiquement compatibles avec les enduits et le support de maçonnerie. Ils doivent aussi garantir une bonne transmission de la vapeur d'eau. Les méthodes optimales de « *grouting* » utilisent le principe de l'injection, à très basse pression contrôlable, d'un matériau liquide dans des pores discrets et jouant sur la gravité comme sur l'évacuation de l'air pour assurer un plein contact interstitiel. Comme tous les traitements de conservation, le « *grouting* » doit être réalisé sous de bonnes conditions climatiques, de façon à garantir un bon séchage, une bonne mise en place et une bonne cure. La température optimale se situe entre 4,5 à 26,5 ° C.) et par jour nuageux humide. Il faut donc éviter le gel, les fortes pluies et les trop grandes chaleurs.

La barbotine de ré-attachement qui a été utilisée sur le site de Fort Union, après l'avoir testée en laboratoire et sur le terrain, est une barbotine légère et de très faible retrait, composée de 3,8 parties de chaux modérément hydraulique, de 3,7 parties de microsphères céramiques, d'une partie de sable fin siliceux et de 10 % (w/v) d'émulsion acrylique ajoutée d'un agent anti moussant. De l'eau potable a été ajoutée et le mélange a été effectué à l'aide d'un mixer à haute vitesse pendant 3 minutes, jusqu'à ce qu'il atteigne une viscosité de 46.58s/500 ml (cône de Marsh), ou la consistance d'une crème épaisse. Cette barbotine est injectée à la seringue en travaillant toujours du bas vers le haut et en éliminant les excès. Les zones traitées sont protégées de la pluie pendant 24 heures avec une feuille de polyéthylène.

• **Compensation**

Toutes les arêtes vives et les parties délaminiées, les cavités de surface et les fissures, sont des voies de pénétration de l'eau. Le traitement de ces parties a été opéré 48 heures après l'injection de barbotine de ré-attachement. Tous les défauts constatés en surface ont été rebouchés à l'aide d'un mortier composé de chaux hydraulique, d'agrégats locaux, choisis pour leur couleur et leur texture (1 partie de chaux pour 4 d'agrégats), de l'alcali et des pigments stables à la lumière solaire. Cette intervention a été exécutée après avoir soigneusement brossé et humidifié par aspersion les zones à traiter.

• **Nettoyage de surface**

Un nettoyage de surface final peut être réalisé après avoir ôté les voiles de tissu ou les gazes de coton. Tous les résidus d'adhésif (alcool polyvinylique) sont brossés à l'eau chaude. Les résidus de barbotine de ré-attachement sont éliminés avec des cure-dents. Un nettoyage final des poussières de surface et de la laitance de chaux est réalisé à la brosse, avec une solution de 10 % d'acide acétique, puis un rinçage à l'eau.

III.14.2. - Ré-attachement et réintégration

Rendant compte des procédés de conservation des bas-reliefs des palais royaux d'Abomey (Bénin), entrepris dans le cadre d'une coopération entre le Ministère de la Culture et des Communications du pays et le Getty Conservation Institute, **Francesca Piqué et Leslie Rainer**, décrivent leurs techniques de travail de conservation-restauration des bas-reliefs originaux.

Une première stabilisation d'urgence consiste à placer un film de protection sur le bas-relief et à fixer les écailles en places. Cette opération peut aussi consister en un nettoyage des fragments détériorés pour garantir un transport en toute sécurité du bas-relief, depuis l'aire de stockage à l'atelier de conservation.

Des réparations structurales des dégâts les plus importants doivent être entreprises. Elles peuvent exiger la mise en place d'une armature sur les lacunes pour préparer la remise en état de l'intégrité structurale du bas-relief. Le principe d'une armature métallique a été adopté, qui est recouverte d'une résine acrylique en dispersion (*Acryloïd B-72*) avant que la terre soit à nouveau façonnée sur cette armature, de façon à éviter la corrosion de l'armature métallique à l'intérieur de la terre.

Il faut également enlever les parties rajoutées, ou les restaurations antérieures contestables, là où elles ne sont pas appropriées. On les enlève jusqu'à retrouver le niveau original.

Le remplissage des lacunes se fait avec du mortier de terre, avec une terre locale tamisée et mélangée avec de l'eau. On stabilise cette terre avec 10 % de chaux hydraulique Lafarge, de façon à retrouver la même résistance, la couleur et la texture du matériau environnant. La chaux est préférée au ciment qui contient des sels solubles.

Une barbotine (« *grouting* »), est préparée à base de terre stabilisée à 10 % de chaux hydraulique et mélangée avec 5 % de résine acrylique (Primal AC33), en dispersion dans de l'eau. Elle servira à boucher des vides se situant derrière la surface qui seront inaccessibles.

Le ré-attachement de la peinture écaillée, en surface, se fait avec une dispersion aqueuse de 20 % de Primal AC33, comme colle appliquée derrière la couche de peinture délaminee.

La consolidation des peintures pulvérulentes se fait avec une dispersion de 3 - 5 % d'*Acryloïd B-72* dans de l'acétone. Cette consolidation est limitée à de petites zones où la peinture a perdu de sa cohésion et principalement pour les couleurs blanche et bleue.

Un nettoyage à sec des dépôts terreux et poussiéreux se fait à l'aide de brosses douces et des poires à air, suivi d'un petit nettoyage humide à l'eau et avec un tampon en coton ou à l'éponge naturelle.

La réintégration esthétique permet de réaliser la présentation du bas-relief incluant la réintégration des éléments dégradés ou manquant du support, des enduits, des reliefs et des peintures. Comme cela est précédemment décrit, cette réintégration se fait à base de mortier de terre présentant une couleur et une texture similaire aux matériaux environnants. Le traitement est minimal avec l'objectif de stabiliser les panneaux et, selon la nature des peintures

réalisées en plusieurs couches, le choix a été de laisser toutes les parties manquantes des figures polychromes, tel quel.

III.14.3. - Ré-attachement, détachement et anastylose

Dans un ouvrage rendant compte d'un colloque sur la Culture Moche des régions de la côte nord du Pérou, s'étant tenu à Trujillo, en avril 1993, nous avons relevé une communication de **Ricardo Morales Gamarra** (1994), développant le propos de la conservation des reliefs de terre polychrome, sur la « Huaca Cao » (Complexe de El Brujo, vallée de Chicama), et sur la « Huaca de la Luna » (Complexe des Huacas « del Sol » et de « la Luna », vallée du Moche, près de Trujillo). Le propos mérite d'être relevé pour ses aspects théoriques et pour la question de la préservation des sites historiques dans la dimension de leur milieu ambiant.

La question soulevée par l'auteur est celle de la conservation d'un système décoratif qui doit être appréhendé comme une « unité structurale-décorative ». Le mur original est constitué d'adobes moulées dans des formes en roseaux, puis postérieurement en bois, construites en assises alternées de boutisses et de paneresses bâties au mortier de terre argileuse. Sur ce support, les reliefs de « Cao » et de « La Luna » ont été élaborés selon un même modèle stylistique, c'est à dire modelés comme un enduit de terre.

Quand le motif correspond à un personnage sous forme de dessin géométrique, la réalisation du relief était originalement travaillée par excision de matière, dans l'épaisseur de l'enduit de terre, c'est à dire, avec des spatules et des cuillères. Par contre, sur la Huaca Cao, le travail original pouvait consister à la fois en une incision de l'enduit et une taille du support en adobe, pour donner davantage de profondeur au relief, mais encore par l'application de moulages. Ces techniques Moche sont assez similaires à celles de périodes antérieures repérées à Chan Chan. Ainsi, ces techniques d'élaboration des reliefs de terre polychromes se résument au moulage, l'excision, l'incision, l'application ou la taille du mur-support. Par ailleurs, sur les différents édifices, la pigmentation correspond à des phases successives de construction et d'occupation. Sur la Huaca Cao (El Brujo), le rouge (hématite), correspond à la 3^{ème} et la 4^{ème} phases ; le jaune (limonite), à la 4^{ème} phase ; le blanc (talc) et le noir (oxyde de fer calciné), ne sont pas présents ; mais le noir (charbon végétal) et le blanc (carbonate de calcium), sont présents pour la 4^{ème} phase ; alors que le bleu (mélange de couleurs), est présent pour les 3^{ème} et 4^{ème} phases.

Les décorateurs de l'époque Moche utilisaient un agglutinant ou un médium adhésif pour fixer le pigment. Il s'agit d'un produit naturel, le « *mucilago de tuna* » que d'autres auteurs péruviens ont déjà présenté (A.M. Hoyle, 1990, op. cit.), procédé attesté par les chroniques espagnoles. Autant sur la Huaca Cao, l'état des reliefs présente d'assez bonnes conditions structurales, autant sur la Huaca de La Luna, la situation est plus grave car les reliefs sont fracturés et séparés du mur-support.

La position théorique de Ricardo Morales Gamarra, pour le traitement de conservation proposé, se fonde sur le critère « d'intervention minimale ». Avec un refus de toute action qui viserait à opérer une restitution esthétique d'éléments perdus. En conséquence, il s'agit de respecter l'état actuel des éléments originaux et d'assurer une neutralisation des agents de dégradation, ainsi qu'une consolidation physique et mécanique des éléments qui configurent le relief mural. Le choix de ne pas réintégrer les couleurs perdues obéit à la faible réversibilité dans un futur possible, alors que la texture rugueuse peut

conserver des restes de pigments originaux dans les pores du matériau et que ceux-ci ne peuvent être que difficilement extraits. Ce relief mural forme une unité avec le cadre architectural qu'il décore et qu'il définit. L'on doit adopter un critère uniforme pour les deux.

Il s'agit bien alors de « conservation préventive ». Et connaissant l'influence des facteurs du milieu ambiant (insolation, vents abrasifs, condensation nocturne), la conservation de ces sites dépend de l'assainissement et de la protection du milieu dans lequel ils se trouvent. Cela est indispensable pour garantir l'efficacité des traitements de consolidation et des activités ultérieures d'entretien. Ainsi les approches de travail qui ont été développées sont les suivantes.

• **Couvertures provisoires**

Considérant les agents de dégradation, la première intention a été de réaliser un système de protection provisoire de manière à éviter les brusques changements hygrothermiques, spécialement entre la nuit et le jour, pendant les opérations de détachement des reliefs. Il fallait essayer d'obtenir un registre de valeurs hygrothermiques plus ou moins stables. Créer un microclimat favorable à la conservation des reliefs polychromes, tout en obtenant une bonne intégration du système de couverture au milieu ambiant et à l'édifice, et en garantissant un faible coût de mise en œuvre. Pour la Huaca Cao, le système a consisté en la réalisation de châssis modulaires tendus de toile polyester plastifiée, posés sur une trame de 5 m, associés à une barrière pare vent en tissage végétal. Ce système assure une préservation contre la pluie, l'insolation et le vent. Pour neutraliser la condensation nocturne, des toiles de coton ont été tendues à 0,5 m de distance des reliefs les mettant à l'abri de l'air direct. Pour la Huaca de La Luna, un système de double couverture adapté à la forme de l'édifice, permet la libre circulation de l'air.

• **Conservation des reliefs**

Le traitement des reliefs s'opère à deux niveaux. D'une part, un traitement préventif et simultané au détachement du relief. D'autre part un traitement définitif et intégré. La première étape doit assurer le renforcement et l'adhérence des éléments séparés à leur emplacement d'origine, en préservant sa localisation et la composition du thème décoratif. Aucun produit synthétique n'est employé. Seulement de l'eau de chaux, de la terre argileuse et de l'alcool comme tensioactif. Simultanément sont réalisés un relevé graphique, photographique et filmé des zones traitées, et une collecte d'échantillons pour les analyses de laboratoire. Le traitement définitif opère une consolidation des reliefs, sa parfaite adhérence au mur-support et la fixation des couleurs. Ce traitement, par expérience, doit se faire le plus vite possible après la première phase.

Comme première activité il s'agit de nettoyer la surface des reliefs par action mécanique, au bistouri et aux pinceaux, sous ampoule électrique et loupes binoculaires. La consolidation est effectuée avec une solution d'éthyle silicate 40 et d'alcool absolu à 99,2 % (0,50 x 1 litre pour chaque m²), et quatre goutte d'HCL comme catalyseur, appliqué par aspersion et recouvert de feuilles de plastique pour éviter une évaporation de l'alcool. Favoriser ainsi une meilleure pénétration du consolidant. La fixation de la couleur est opérée avec une solution de *Paraloid B-72* à 2 %, dans un solvant acrylique, appliquée au pinceau et strictement sur la zone colorée afin d'éviter l'assombrissement des

lacunes. Cette opération a été faite une semaine après l'application du silicate, après avoir récupéré la tonalité originale.

• **Détachement-anastylose**

Le mur sud de la Huaca de La Luna qui présentait un faux aplomb de 32 cm à 1 m de hauteur, s'est effondré sur 6 m. de longueur. Mais les reliefs polychromes ont gardé une relative adhérence aux briques d'adobe détachées ou effondrées. Toutefois la cohésion de la terre était très réduite et les arêtes très fragiles. La couleur disparaissait au simple contact, à cause de son état pulvérulent. Il a donc fallu combiner les techniques de détachement et d'anastylose. Un traitement spécifique d'urgence s'imposait pour chaque adobe portant un élément de relief polychrome. Il a consisté à renforcer les bords avec du mortier de terre argileuse, sans produit chimique, à éliminer toutes les traces de la pluie et de terre collée sur la surface, à l'aide du bistouri et de la loupe binoculaire. Puis après avoir pris un calque des reliefs, la consolidation a été opérée avec une solution de 0,50 litre d'éthyle silicate 40 et de 1 litre l'alcool absolu ajouté de 4 gouttes d'HCL par m² traité, appliqué par aspersion. La semaine suivante, réalisation d'un traitement complémentaire, comme décrit auparavant, avec une solution de *Paraloïd B-72* à 2 % dans un solvant acrylique appliqué au pinceau sur les zones colorées du relief. Cette technique de consolidation a permis une manipulation aisée de tous les fragments, particulièrement au moment de leur détachement puis de leur réintégration. Le mur-support a été restructuré en remplaçant les adobes selon le principe d'appareillage original et en remplaçant le mortier en mauvais état, tout cela avec des adobes originales. Puis, les éléments du relief polychrome ont été ré-attachés sur le mur-support avec une barbotine d'argile facilitant une bonne adhérence au mur, qui a été postérieurement renforcée avec des injections de PVA dilué à 5 % dans de l'eau distillée.

III.15. - Traitement de la biodétérioration

La question du traitement des pathologies de biodétérioration affectant les architectures de terre n'est pour ainsi dire par développée par les chercheurs, même si la tendance actuelle de la recherche en conservation commence à l'intégrer et à ouvrir de nouvelles voies d'investigation. Nous avons repéré cette volonté d'aborder la question dans le cadre de la plus récente conférence internationale sur la « Biodétérioration de l'héritage culturel » (ICBCP-4), organisée à Téhéran, en novembre 1998, par l'ICHO et le RCCCR, avec le soutien de l'UNESCO et de l'ICCROM.

Mais on aura noté que 2 interventions couvrant le domaine spécifique de la biodétérioration des architectures de terre ou des enduits recouvrant les structures. L'une sur le nettoyage de la microvégétation sur les enduits à base de chaux (**R.K. Sharma, V. K. Saxena et S.L. Tweari**, Inde), et l'autre sur la question du ravage causé par les termites aux maçonneries d'adobe (**R. Vatandoust**, ICHO-RCCCR, Téhéran, Iran). Mais nous ne pourrions davantage développer ces propos car nous n'avons eu à notre disposition que les « abstracts » de ces interventions.

On remarque donc que le développement des recherches dans ce domaine est tout à fait balbutiant alors qu'il a sans aucun doute progressé pour ce qui est du traitement de la biodétérioration des structures en pierres, en briques cuites, en bois, ou même des artefacts en céramique ou en matériaux organiques

(papiers, tissus), ou encore pour ce qui est du traitement des peintures. Mais, plus généralement c'est la question du nettoyage des matériaux affectés par une forme de biodétérioration qui focalise l'intérêt des opérateurs. La question de la cure « de fond » ne semble pas être traitée ou abordée de façon très superficielle. On peut rapporter cette lacune au manque de techniques ou de procédés spécifiques dont l'efficacité aurait été suffisamment confirmée par des campagnes d'expérimentation, de « monitoring » et d'évaluation. Par exemple, la biodétérioration des matériaux de terre générée par les insectes, guêpes « maçonnes » ou autre espèces, termites de terre ou aériennes, laisse les opérateurs très démunis. Il n'est pas de produit « miracle » (insecticide et autres produits chimiques), pour traiter efficacement ce problème, même si de nombreux produits commercialisés existent. Il faut bien alors reconnaître ici que ce type de biodétérioration doit être étudiée au-delà d'un seul tropisme, « à la lunette », sur le phénomène, en prenant en compte l'environnement et les conditions du matériau ou des structures. Car on le sait bien, l'humidité, les sels, les microvégétaux et autres champignons qui accompagnent généralement la présence d'insectes, entretiennent le processus. Car, le climat ambiant et des facteurs comme l'humidité relative associée à la chaleur, la condensation de la vapeur aux heures froides, jouent également un rôle important. Comme d'ailleurs le comportement des hommes (entretien, nettoyage).

Alors, concernant notre domaine de la conservation des architectures de terre, avant de porter plus avant la lunette sur l'échelle « micro » - même si cela est nécessaire - ne conviendrait-il pas d'aller encore plus avant dans le traitement des problèmes à l'échelle « macro » et à des échelles « intermédiaires », qui nous rapprocheraient de cette échelle micro, considérant davantage l'hypothèse de l'effet « domino » d'une suite d'effets et de conséquences entre ces différents niveaux d'échelles et un éventail assez large de facteurs « ambiants » ?

En tout cas il serait sans aucun doute préférable de ne pas trop cloisonner ou fragmenter les niveaux d'investigation et de conserver en toute occasion une perception plus holistique des problèmes et de leurs traitements. Le spécialiste ne doit pas oublier d'être aussi un « généraliste ».

III. 16. – Synthèse et conclusions

III.16.1. – A propos des types d'interventions et de traitements

La question de l'intervention et des traitements visant à traiter les pathologies de l'architecture de terre dans le but de rétablir un système d'équilibre entre les matériaux, les systèmes de structure et de construction, l'architecture et son environnement, est essentielle. Cette intervention et ces traitements ne sauraient être engagés ou appliqués, sans définir au préalable un ensemble de « stratégies » répondant à l'objectif de préservation de l'objet, à court terme, puis de conservation et de mise en valeur, à moyen et long terme. Ces stratégies, fondées sur l'évaluation de l'état et sur un bon diagnostic, mais aussi sur une mise en perspective, une « projection », précisent le degré d'intervention et de traitement, avec les mobilisations humaines, matérielles et financières, s'appuyant sur le déploiement de techniques, de procédés de préservation et conservation dont l'éventail est large. Mais, selon les objectifs que l'on se donne, il est possible d'intervenir à différents niveaux et à différentes échelles de l'objet architectural. On peut ainsi engager des actions de stabilisation et de réparation de base, en intervenant d'abord sur les abords

immédiats de l'objet (nettoyage, désherbage et débroussaillage, drainage), puis, de façon minimale sur l'objet lui-même (réparation structurale de la base des murs (réintégration, reconstruction partielle, construction de talus de drainage, réparations de toitures, de gargouilles, d'acrotères, réparations de parties dégradées, etc.). L'objet traité est mis en situation de « risque minimum », comme l'ont souligné quelques auteurs. Ces interventions de stabilisation et de préservation une fois réalisées, si elles s'avéraient nécessaires, il est alors possible d'intervenir à d'autres niveaux, à d'autres échelles, en application de stratégies sur le moyen et le long terme, et en mobilisant d'autres techniques et modes d'intervention.

A ce stade, mais tout en l'ayant déjà anticipé, se pose la question d'un meilleur contrôle de l'environnement et d'un entretien régulier pour garantir le rétablissement et le meilleur fonctionnement possible du système d'équilibre réinstauré, dans une plus large dimension, au-delà de l'objet traité et de sa proximité immédiate et en intégrant le facteur temps (durée). Plusieurs types d'intervention et de traitements sont alors possibles que l'on aura passé en revue dans cette troisième partie de notre révision littéraire. Mais revenons sur quelques unes de ces interventions qui semblent retenir davantage l'intérêt des chercheurs et des opérateurs.

La question de la protection qui a été notamment résumée par A. Stevens, (1985), et P.S. Jerome, (1991), ne peut être limitée à des considérations sur l'esthétique des systèmes d'abris ou de toitures même si l'impact sur les sites ou édifices conservés, et sur le paysage environnant, sont un aspect décisif de la question. Cela a été clairement relevé pour qu'il ne soit plus nécessaire d'y revenir. Mais, les impacts, les effets, de ces abris de protection sur les objets archéologiques ou architecturaux traités demeurent très préoccupants lorsqu'ils contribuent de nouveau à rompre le système d'équilibre et à engendrer de nouvelles pathologies. Ce risque ne doit jamais être sous-estimé et il est vraiment important de le souligner encore. Par contre, le procédé visant à « enrober » les vestiges par une couche d'enduit de protection ou par des matériaux stabilisés sacrificiels, qui contribue de fait à dissimuler les matériaux d'origine, peut être très discuté, au plan éthique comme au plan technique (risque d'imperméabilisation, de blocage de la respiration des matériaux, avec les conséquences que l'on connaît). L'enrobage, s'il est utilisé devrait plutôt utiliser des solutions respirantes tout en garantissant une résistance à l'érosion et aux dilatations thermiques différentielles (nuit/jour, saisons). Comme on l'a noté dans nos commentaires, jusqu'à quel point faut-il se préserver, voire se protéger, se « blinder » des éléments naturels (pluie, vent, soleil), ou quelles latitudes avons-nous pour « jouer » avec eux, pour « faire alliance ». Il n'est en effet pas sûr que l'on ait jusqu'alors abordé la question de la conservation des architectures de terre sous cet angle d'attaque.

L'intervention de protection des vestiges exposés à l'érosion et l'abrasion des éléments, par « capping », a été relevée comme une priorité par beaucoup de chercheurs et d'opérateurs qui ont largement expérimenté dans ce domaine avec des résultats plus ou moins bons. La synthèse de cette question proposée par Michel Romero Taylor, (1987, op. cit), devrait davantage guider les opérateurs pour intervenir plus efficacement, en connaissance des problèmes posés et surtout des raisons de faire appel à ce procédé, tout en mieux maîtrisant les pratiques d'intervention.

L'intervention de préservation-protection par « backfilling » ou ré-enterrément, a été relevée par beaucoup de chercheurs et d'opérateurs comme l'un des meilleurs procédés, si ce n'est « le » meilleur. Il est à la fois adapté pour

protéger les aires fouillées, en cours de documentation (entre les campagnes de fouilles) ou une fois documentées, lorsque les aires concernées, soit ne méritent pas d'être exposées, soit doivent être impérativement protégées du fait de leur très grande valeur culturelle. On aura vu combien la recherche a investi ce domaine d'intervention en visant à optimiser le procédé, notamment en recherchant de nouveaux types de sédiments et/ou de matériaux de comblement, ou bien en l'associant avec des solutions de drainage. On aura vu aussi les problèmes que peut poser un « backfilling partiel » entre des aires adjacentes. D'autres évaluation réalisées par Katherine Dowdy et Michael Romero Taylor, (1993), que l'on présentera dans la partie suivante apporteront d'autres éclaircissements et d'autres arguments décisifs sur l'intérêt et l'efficacité de ce procédé de « backfilling ».

On aura aussi révisé les procédés d'intervention visant à traiter les problèmes de capillarité à la base des murs. Et l'on aura perçu combien les expérimentations variées qui ont pu être développées pour innover en la matière, donnent des résultats très inégaux. On aura aussi vu que les procédés visant à intervenir sur les « effets » de la capillarité, et non sur les « causes », peuvent être discutés, voire remis en question. Les solutions de drainage de la base des murs, traditionnelles et adaptables, améliorables avec les solutions de « géodrains », selon l'ampleur des problèmes posés, selon les types de structures, et selon la nature des sols environnants, associées à un entretien régulier ne semblent-elles pas finalement être celles qui offrent le plus de possibilités ?

Pour ce qui concerne les interventions sur les structures, on aura révisé notamment les procédés de réintégration et/ou reconstruction partielle des structures endommagées, ainsi que le rebouchage des fissures. On aura bien compris que la question de la « compatibilité » des matériaux de traitement utilisés, avec les matériaux d'origine, est fondamentale pour garantir la qualité de ce traitement visant à rétablir l'intégrité de liaisonnement et de stabilité des structures.

Les principes et procédés de réparation ou de « mitigation » des dégâts sismiques, ont réellement progressé au cours de ces 15 dernières années. Les recherches menées dans les universités américaines de Californie et au Pérou, prolongées par le projet GSAP du GCI, associées aux observations de terrain sur des bâtiments en adobe endommagés par les séismes, auront directement contribué à mieux connaître le comportement des structures en terre exposées au risque sismique. Mais, ces travaux auront aussi permis de proposer une typologie de mesures efficaces pour les interventions de réhabilitation rétroactive. Les interventions de caractère « préventif » en sont également améliorées et l'on sait mieux aujourd'hui distinguer l'efficacité, comme la pertinence d'intervention de renforcement, de confinement, ou d'amélioration de la stabilité.

La question de la protection de surface des structures en terre est sans doute l'une des plus vaste, et complexe également, du fait d'un éventail de plus en plus large de techniques d'intervention, de matériaux et de « produits ». L'intérêt de la réhabilitation des techniques d'enduits et de badigeons traditionnels a été confirmé par plusieurs expériences mais, la récupération des savoir-faire comme la nécessité d'un entretien périodique, demeurent à la fois un atout et une contrainte. L'évolution des recherches en matière de consolidation chimique aura donné de nouvelles ouvertures, tout en ne garantissant pas une égalité des résultats qui demeurent sujets à de nombreux facteurs intrinsèques et extrinsèques pouvant optimiser comme contrarier l'efficacité des traitements. On

aura aussi vu les hésitations des opérateurs sur le choix des techniques (préparation en solution aqueuse ou en solution de solvant catalyseur, imprégnation par aspersion ou par badigeon, application à l'état sec ou à l'état humide), et sur le choix des produits dont la gamme n'a cessé de s'élargir (résines, émulsions acryliques, monomères, copolymères, éthyliques silicates et polysilicates, etc.). Ces hésitations ont pu conduire certains à ré-expérimenter des produits « naturels » et donc à prendre à nouveau acte de la nécessité d'un entretien périodique. Mais, ces recherches sur la consolidation chimique auront surtout permis de mieux préciser les paramètres de l'efficacité des traitements. On aura ainsi pu relever le rôle joué par la texture des terres (matériaux à dominante silto-argileuse ou à dominante sablo-argileuse), par leur minéralogie (stabilité des argiles), par la condition physique des matériaux (cohésion notamment) et les réactions qui peuvent s'en suivre. On aura vu les améliorations certaines apportées par certains produits chimiques comme les effets pervers, voire dramatiques. On aura aussi compris qu'une hydrophobisation trop poussée peut être très dangereuse et qu'il convient, tout en imperméabilisant, de conserver une texture assez ouverte pour garantir l'évaporation de l'humidité sous forme liquide, comme de vapeur. On aura aussi bien compris le rôle du climat ambiant et l'impact de la variation des régimes de température diurne et nocturne, ou des climats saisonniers sur l'efficacité des traitements. On aura aussi vu que des interventions « douces » sont toujours possibles et qu'elles peuvent donner d'excellents résultats.

Les modes d'intervention plus complexes, voire sophistiqués, visant à conserver les surfaces décorées, ont également bénéficié des progrès accomplis dans la consolidation chimique. Certains produits ont été repérés comme donnant d'excellents résultats avec, semble-t-il un avis partagé par la communauté des opérateurs spécialisés dans ce domaine très « pointu ». Les propos de Constance S. Silver, (1990), de Franck Matero, (1995), de Ricardo Morales Gamarra, (1994), de Francesca Piqué et Leslie Rainer, (1996), nous auront éclairé sur les procédés de stabilisation et consolidation, de ré-attachement par « grouting », de compensation, de détachement et réintégration, et d'anastylose. Ce sont des techniques qui doivent être considérées comme très au point et d'une grande efficacité mais qui exigent une grande délicatesse d'intervention au risque de ruiner davantage les vestiges les plus dégradés.

Enfin, on aura remarqué les lacunes importantes qui demeurent quant à la question des interventions pour le traitement de la biodétérioration des matériaux de construction en terre. En effet, ce domaine spécifique commence à peine à être investi par les chercheurs, si fait que l'on est pas encore en mesure de le discuter, au-delà d'une simple introduction.

III.16.2. – A propos de l'évaluation des interventions et traitements

Les évaluations dont on a rendu compte permettent-elles de tirer des enseignements « largement applicables » ? Une fois encore, tout est affaire de « cas unique » quant à l'efficacité des traitements qui sont directement tributaires du type de matériau traité, de sa texture, de sa minéralogie, mais plus encore du degré d'intégrité « constructive » et « architecturale », dans un contexte, ou un environnement donnés. Ce que l'on doit retenir nous semble davantage devoir être du domaine des méthodes et des procédures, des modes de traitement, plus que des « produits » ou du domaine de la « recette ». Il n'y a pas de produit « miracle », il n'y a pas de « recette ». Il n'y a que des caractéristiques, des propriétés, des interrelations aux environnements distincts et des façon de bien comprendre les problèmes pour tenter de bien les

résoudre. Certes, certains traitements donnent de meilleurs résultats et ils peuvent être de nature « physique » comme de nature « chimique » ou, à l'interface, « physico-chimique ». Les recherches et les expérimentations qui ont pu être évaluées donnent des résultats assez variés et tendent à montrer que l'architecture de terre « vit », « réagit » avec son environnement et que l'on ne peut espérer que pouvoir ralentir les effets de ces facteurs environnementaux, avec plus ou moins de succès.

On aura noté que le procédé de « backfilling » est reconnu comme un mode très efficace de protection et de préservation des vestiges archéologiques. Au cours des dernières années, ce procédé a été nettement amélioré par l'optimisation des drainages et par un meilleur contrôle de la percolation de l'eau de surface (utilisation de géotextiles, réalisation de couches de sédiments argileux saturants, ou systèmes améliorant l'évaporation de l'humidité). L'évaluation du procédé utilisé au début du siècle sur le Pueblo Bonito de Chaco Canyon, par K. Dowdy et M.R. Taylor (1990), est riche d'enseignements en restituant des données issues d'une campagne de « monitoring » effectuée après 70 années. On peut ainsi confirmer la bonne qualité de protection des traits architecturaux essentiels, mais aussi toutes les précautions qu'il convient de prendre lorsque l'on souhaite remettre au jour des vestiges pour documenter à nouveau leur état. Précautions à prendre pour l'enlèvement du matériau de comblement ; précautions à prendre pour contrôler la vitesse de séchage des sédiments (soleil, vent) qui retiennent de l'humidité dans les couches de surface. Les tests montrent aussi que la croissance de la végétation peut avoir des effets néfastes sur la conservation des enduits originaux et peuvent ainsi valider l'utilisation régulière de produits herbicides. L'utilisation de sédiments sableux donne d'excellents résultats du fait d'une bonne propriété de percolation-filtration de l'eau autant que d'évaporation de l'humidité. Un souci demeure : mieux garantir la qualité de la protection pour les couches supérieures, jusqu'à au moins 30 cm d'épaisseur.

Pour ce qui est des solutions de protection de surface, ce sont sans doute les évaluations comparées qui fournissent le plus d'enseignements. Les enduits traditionnels à base de terre, de terre amendée de paille, de terre stabilisée à la chaux, ou de chaux naturelle hydratée, l'utilisation de stabilisants « naturels », sont réhabilités avec un intérêt divers des opérateurs, selon que l'on doive préserver des ressources de nature archéologique ou des édifices historiques. Pourtant, les expériences réalisées en conservation des sites archéologiques sont le plus souvent très concluantes, positives. Mais, la question de l'entretien périodique (pour les enduits en terre seule ou en terre amendée en paille, notamment), semble demeurer un frein pour une plus large réhabilitation de ces pratiques d'enduits traditionnels. C'est moins le cas pour la conservation des édifices historiques où la réhabilitation des enduits à base de chaux est largement acceptée. D'autres programmes de recherche sur murets-tests ont montré que les mortiers bâtards (sable-chaux, sable-chaux-ciment), présentent de très bonnes potentialités alors que les solutions de badigeons à la chaux exigent un entretien fréquent. L'utilisation des peintures ne donne pas, dans l'ensemble, de bons résultats.

Pour ce qui est des consolidants chimiques, ce sont surtout des programmes de recherches expérimentales qui nous offrent des résultats discutables, parfois dignes d'intérêt. Mais dans l'ensemble, ces résultats sont très inégaux et l'on en reste encore, assez globalement, à l'expérimentation, sans application trop large, car de nombreux problèmes demeurent. Il est en tout cas assez clair que la minéralogie et la texture des matériaux de terre traités aux consolidants chimiques, jouent un rôle décisif dans l'efficacité de ces traitements. De même,

un trop grande quantité d'argile par rapport aux composants sableux, réduit notablement l'efficacité des traitements de consolidation chimique. L'état des conditions physiques du matériau, et particulièrement son degré de cohésion, est aussi un facteur décisif. D'autres recherches semblent aussi montrer que l'amendement en consolidant chimique dans la masse, lors de la préparation des mortiers de protection (gâchage), est plus efficace que le traitement postérieur par aspersion ou par imprégnation à la brosse ou au rouleau à peinture. A choisir entre les procédés de traitement par pénétration forcée, par aspersion ou par imprégnation à la brosse ou au rouleau, c'est l'aspersion qui semble donner les meilleurs résultats, dans la mesure où l'évaporation du solvant volatil est retardée et dans la mesure où la viscosité du produit est adaptée pour garantir une bonne pénétration. Beaucoup de chercheurs et d'opérateurs restent encore sceptiques sur la pertinence de ces traitements chimiques du matériau terre et les mettent volontiers en balance avec d'autres procédés de conservation plus traditionnels, dont le principe de réalisation d'enduits sacrificiels qui devront être entretenus et périodiquement restaurés. Les expériences plus spécifiques faites avec les éthylo-silicates, au cours de ces presque 30 dernières années, montrent que ces produits offrent des propriétés intéressantes mais donnent des résultats très variés qui sont difficiles à évaluer. Une étude plus poussée des facteurs pouvant affecter l'efficacité de ce type de traitement nous semble toujours indispensable. Il semble que le procédé agisse de manière très lente, que son effet s'affaiblisse dans le temps et que le traitement doive donc être répété. Quelles sont alors les limites de performance économique du procédé vis à vis de solutions plus classiques qui nécessitent, elles aussi, un entretien (pour les sommets et les bases des murs en terre, moins que pour leurs parois courantes), des réfections périodiques, et qui sont à l'évidence moins onéreuses et qui valorisent les cultures locales comme les emplois locaux ? Car le coût des consolidants chimiques reste un argument défavorable.

Le procédé de protection des sommets de murs en terre par « capping » reste sans aucun doute l'un des plus efficaces mais doit, autant que possible, privilégier l'emploi de matériaux compatibles afin de contrôler le risque d'érosion différentielle entre le sommet et la paroi. Le traitement de la base des murs (plate-forme d'évacuation du ruissellement, drainage), reste indispensable. L'entretien des « cappings » est également une activité incontournable. Le principe des « cappings » évaporant plutôt que ruisselants semble doté de potentialités intéressantes qui mériteraient d'être davantage explorées par la recherche expérimentale.

Il y a aussi des limites à poser pour ce qui est de « l'amélioration » des solutions traditionnelles par ajouts de stabilisants ou de consolidants. Les pratiques ne peuvent en tout cas être uniquement des expérimentations trop « empiriques » et mériteraient un suivi scientifique plus soutenu par des campagnes de « monitoring » suivies d'évaluations. Par ailleurs, dans cette démarche, trop de fantaisie pourrait nuire à une recherche « raisonnée » des potentialités offertes par cette voie.

La protection « aérienne » par géotextiles présente des intérêts pour une conservation préventive temporaire et totalement réversible, en attente d'interventions plus durables. Mais il y a une incompatibilité évidente avec la mise en valeur esthétique des ressources architecturales traitées ainsi que sur l'impact visuel dans le paysage.

Les recherches sur les techniques de conservation des édifices affectés par le risque sismique ont été nettement garantes de résultats directement utiles pour

une conservation préventive, comme pour des interventions rétroactives. La réintégration de la stabilité des structures et de la liaison mécanique des systèmes construits, est une voie qui s'affirme comme les plus dignes d'intérêt et que l'on peut opposer au renforcement. Mais il y a toujours une querelle d'école pour ce qui est du champ spécifique des architectures de terre dans la mesure où les intervenants sont davantage liés au domaine de l'ingénierie sismique appliquée aux techniques de construction contemporaines (béton armé, acier, etc.).

Il nous faut relever, au terme de cette révision de la littérature scientifique couvrant les 15 dernières années des recherches et des applications dans le domaine de la conservation des architectures de terre, qu'il n'est pas finalement aussi simple ou si sûr d'affirmer que le matériau terre et les structures bâties avec ce matériau, doivent être totalement protégées de l'eau, c'est à dire « hydrophobisées », pour employer un néologisme, ou « imperméabilisées ». Cela malgré les tendances de la recherche et de l'expérimentation qui ont été portées par cette approche, notamment avec la consolidation chimique. Nous avons perçu, dans l'ensemble de la littérature, quelles que soient les problématiques de recherche, une conception largement admise par la communauté des chercheurs et des opérateurs. L'architecture de terre, qu'elle soit vestige archéologique ou édifice historique à conserver, doit « respirer », doit « faire alliance » avec l'environnement. De ce fait, l'architecture de terre doit fondamentalement être « entretenue » et si possible « vécue », être « utilisée » pour garantir sa survie, sa pérennité. L'efficacité de la réhabilitation des formes de protection et d'entretien traditionnels (techniques de protection de surface, notamment), que l'on opposera pas à celle des traitements « pétrifiants » qui peuvent aussi donner des résultats dignes d'intérêt, est souvent relevée mais, une fois encore, exige un investissement d'entretien.

La conservation du patrimoine architectural en terre, comme sa mise en valeur, exigent une mise en situation physique, climatique, économique et socioculturelle. Elles exigent une problématisation plus réaliste, c'est à dire incarnée dans les faits de société, dans la perspective d'un développement durable, bénéficiaire aux sociétés qui les assurent, c'est à dire créatif de richesses, d'une plus-value sociale et économique fondées sur une large reconnaissance de l'histoire, des cultures, des différences. On se doit de dire qu'il est encore nécessaire « d'apprendre » car la « science » de la conservation des architectures de terre est à peine naissante, même si elle restitue l'évidence de belles promesses d'accomplissement pour l'avenir.

Devant la force et la beauté de cet héritage des architectures de terre que nous voulons conserver, il nous faut encore rester modestes, écoutant et observant, mais aussi continuer à chercher, à expérimenter. Il nous faut surtout davantage évaluer et partager les expériences, les résultats. Nous avons aussi, sûrement, encore beaucoup à apprendre de ceux qui les ont érigées en « intelligence constructive », en « maîtrise architecturale », pour que ces architectures de terre aient daignées parvenir jusqu'à nous, au delà des millénaires.

BIBLIOGRAPHIE

1992

Testing of strategies for archeological ruins protection at Chaco Culture National Historical Park. National Park Service, The Getty Conservation Institute. Washington / Los Angeles. U.S.A.

1992

Nuestra señora de Guadalupe church, Zuñi, New Mexico. Condition assessment. The New Mexico Community Foundation. Santa Fe. U.S.A.

1993

Réduire la vulnérabilité du bâti par la récupération des cultures sismiques locales. In: *Atlas des cultures sismiques locales*. Centre universitaire européen pour les biens culturels Ravello. Ravello. Italia.

1995

Conservation on archaeological excavations with particular reference to Mediterranean area. ICCROM. Rome. Italia.

1997

Conserving historic earthbuildings. In: *EBANZ newsletter*. November 1997. p. 28-40. EBANZ. Whangarei. Federal Republic of Germany.

1997

Preservation plan: Fort Union National Monument. In: *US/ICOMOS*. n° 5. p. 7. US/ICOMOS. Washington. U.S.A.

Abraham B., Brindel-Beth S., Florentin G.H., de Maisonneuve P.

1993

Le bâti pan de bois. EDF. Paris. France.

Agnew N.

1990

The Getty adobe research project at Fort Selden. I. Experimental design for a test wall project. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints*. p. 243-249. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Amihai Mazar

1999

The conservation and management of mudbrick buildings at Tell Qasile, Israel. In: *Conservation and management of archaeological sites*, p. 103-108. James and James. London. U.K.

Andrews R.

1990

The manufacture and use of adobe bricks in buildings. In: *Technical papers volume for the national seminar on mud in habitat. 7th & 8th december 1990 Manipal*. HUDCO. New Delhi. India.

Australia/ICOMOS

1996

The Australia ICOMOS charter for the conservation of places of cultural significance (the Burra charter). Australia/ICOMOS. Sydney. Australia.

Baldussi A.

1994

Etude pour une réhabilitation des architectures de terre en Sardaigne. EAG. Grenoble. France.

Baradan B.

1990

A new restoration for adobe structures. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints. p. 149-152*. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Barker P.

1986

Temporrary shelter and site protection. In: *Preventive measures during excavation and site protection. Conference. Mesures préventives en cours de fouilles et protection du site. Ghent, 6-8 novembre 1985. p. 45-49*. ICCROM. Rome. Italia.

Bedford P.

1994

The conservation of town farmhouse, Gittisham, Devon. In: *Out of Earth, Dartington, 4-6 May 1994. p. 42-45*. School of Architecture, Centre for Earthen Architecture. Plymouth. U.K.

Bendakir M.

1993

Recherche pour la préservation des architectures de terre. Le site archéologique de Mari (Syrie). EAG. Grenoble. France.

Caperton T.J.

1990

Fort Selden ruins conservation. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints. p. 209-211*. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Caperton T.J.

1994

An evaluation of geotextile shelters : Fort Selden, New Mexico. In: *US/ICOMOS. Committee on earthen architecture. n° 10. p. 5-7*. US/ICOMOS. Washington. U.S.A.

Chiari G.

1990

Chemical surface treatments and capping techniques of earthen structures: a long-term evaluation. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints.* p. 267-273. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Coffman R., Agnew N., Austin G., Doehne E.

1990

Adobe mineralogy: Characterisation of adobes from around the world. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints.* p. 424-429. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Coffman R., Selwitz C., Agnew N.

1990

The Getty adobe research project at Fort Selden. II. A study of the interaction of chemical consolidants with adobe and adobe constituents. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints.* p. 250-254. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Collombet R.

1989

L'humidité des bâtiments anciens. Causes et effets. Diagnostics et remèdes.. In: *ANAH.* Editions du Moniteur. Paris. France.

Crocker E.

1996

Cornerstones community partnership. Selections in earthen technology. N° 1. Dust to dust : the utilization of bones in adobe repair. Cornerstones. Santa Fe. U.S.A.

Crocker E.

1993

The purpose and mechanics of lime renders. In: *7a conferência internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra. 24 a 29 de Outubro 1993, Silves, Portugal,* p. 433-438. Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Lisbon. Portugal.

Crocker E.

1992

The New Mexico Community Foundation : selections in earthen technology. No. 2 straw daubs : how fiber cuts erosion. In: *US/ICOMOS Newsletter.* n° 7. p. 11-12. US/ICOMOS. Washington. U.S.A.

Crocker E., Romancito A.E., Uviña F.C., Waikaniwa R.

1996

Condition report. San Estevan del Rey church, Acoma, New Mexico. Cornerstones Community Partnerships. Santa Fe. U.S.A.

Crocker E., Uviña F.C.

1996

Condition report. Santa Ana church. Santa Ana de Tamayá pueblo, New Mexico. Cornerstones Community Partnerships. Santa Fe. U.S.A.

Crosby A.

1996

Patologia humeda y deterioro. Patologia estructural y deterioro. In: *Curso Panamericano sobre la conservación y el manejo del patrimonio arquitectónico histórico-arqueológico de tierra, 10 de noviembre al 14 de diciembre de 1996. Chan Chan Perú, PAT 96. INC-Perú ; CRATerre-EAG ; ICCROM ; The Getty Conservation Institute. Lima / Grenoble / Rome / Los Angeles. U.S.A.*

Dassler L.

1990

Nineteenth Century New York State earthen homes: an investigation of their material composition. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints. p. 430-437. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.*

Dayre M., Kenmogne E.

1993

Etude des transferts d'humidité dans les blocs de terre crue compactée : influence de la structure des terres. In: *7a conferência internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra. 24 a 29 de Outubro 1993, Silves, Portugal, p. 348 - 352. Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Lisbon. Portugal.*

De Chazelles C.A., Poupet P.

1989

Analyses archéologiques et sédimentologiques des matériaux de terre crue de l'architecture protohistorique à Lattes. Provenance et technologie. In: *Lattara 2. p. 11-32. Lattara. Lattara. France.*

De Olarte Tristan J.L., Guzman E.

1993

The challenge of the systematic building with soil. In: *7a conferência internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra. 24 a 29 de Outubro 1993, Silves, Portugal, p. 515-520. Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Lisbon. Portugal.*

Delcambre P.

1987

Démarche pour un diagnostic de l'environnement en préalable au diagnostic à effectuer pour la réhabilitation d'un immeuble ancien. In: *Le patrimoine Européen construit en terre et sa réhabilitation. Colloque international 18-19-20 mars 87 à l'ENTPE. p. 519-528. Formequip. Lyon. France.*

Demehati A.

1990

Contribution à l'étude de correlations et de l'utilité de paramètres de l'identification des sols. In: *1er séminaire international sur l'Ingénierie des constructions en terre, 30-31 Mai, 1er Juin 1990, Marrakech. LPEE. Casablanca. Morocco.*

Dix L.A.

1997

Materials in the laboratory. Earthen plasters, mortars, and paints from mug house. In: *CRM. vol. 20. n° 10. p. 43-45. US Department of the Interior, National Park Service, Cultural Resources. Washington. U.S.A.*

Doat P., Guillaud H., Houben H., Laraki M., Kergreis M., Hmami J., Boulali M., Kabbaj A., Latifi A.M.

1983

Marrakech 83. Habitat en terre. Aide à la conception architecturale. Rexcoop, Erac-Tensift. Paris. France.

Dowdy K., Taylor M.R.

1993

Investigations into the benefits of site burial in the preservation of prehistoric plasters in archaeological ruins. In: *7a conferência internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra. 24 a 29 de Outubro 1993, Silves, Portugal, p. 480-487.* Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Lisbon. Portugal.

Dubus M.

1990

Les points sur les possibilités de l'électro-osmose pour la conservation de l'architecture de terre. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints. p. 401-413.* The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Feilden B.M., Jokilehto J.

1993

Management guidelines for world cultural heritage. ICCROM ; UNESCO ; ICOMOS. Rome / Paris. France.

Garralón Jorba J.

1991

Eflorescencias. In: *Jornadas sobre restauracion y conversación de monumentos. Madrid, 24 y 25 de abril de 1989. p. 185-190.* Instituto de conservación y restauración de bienes culturales. Madrid. Spain.

Gbenou J.

1984

Le patrimoine architectural traditionnel en République Populaire du Bénin. Nature - Politique de conservation - perspectives d'avenir. In: *Séminaire national. Réflexion sur la situation des musées en République Populaire du Bénin. Infosec - Cotonou : du 23 au 27 juillet 1984. p. 91-109.* Infosec. Cotonou. Benin.

Green M.

1995

San Gabriel Mission Museum : seismic damage repair and mitigation project. In: *Workshop on the seismic retrofit of historic adobe buildings. March 10, 1995 at the J. Paul Getty Museum. p. 31-33.* Earthen Building Technologies. Pasadena. U.S.A.

Guarner González I.

1991

Muralla de Niebla, Huelva. In: *Jornadas sobre restauracion y conversación de monumentos. Madrid, 24 y 25 de abril de 1989. p. 143-148.* Instituto de conservación y restauración de bienes culturales. Madrid. Spain.

Guillaud H.

1986

Projets de construction en terre ou de réhabilitation réalisés en France. Synthèse. In: *Actes de colloques sur la "Modernité de la construction en terre-1984". Vaulx-en-Velin, 10-11-12 octobre 1984. p. 225-237. Plan Construction, ENTPE, EPIDA. Paris. France.*

Guinea M.J.

1991

Consolidación, mejora y nuevas técnicas de construcción con tierra. In: *Jornadas sobre restauracion y conversacion de monumentos. Madrid, 24 y 25 de abril de 1989. p. 135-141. Instituto de conservación y restauración de bienes culturales. Madrid. Spain.*

Hakimi A., Acharhabi A.

1987

Humidité dans les constructions et principaux problèmes pathologiques de la médina de Fes. In: *Le patrimoine Européen construit en terre et sa réhabilitation. Colloque international 18-19-20 mars 87 à l'ENTPE. p. 271-306. Formequip. Lyon. France.*

Hartzler R.

1996

Acrylic-modified earthen mortar. Professional paper n° 61. Intermountain Cultural Resource Center. Santa Fe. U.S.A.

Hartzler R.

1997

Acrylic-modified earthen mortar. In: *CRM. vol. 20. n° 10. p. 50-52. US Department of the Interior, National Park Service, Cultural Resources. Washington. U.S.A.*

Helmi F.M.

1990

Deterioration and conservation of some mud brick in Egypt. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints, p. 277-282. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.*

Hereida E., Vargas N., Bariola B.

1995

Impermeabilizacion de construcciones con tierra. In: *Habiterra. Exposición iberoamericana de construcciones de tierra, p. 226-227. ESCALA. Santafé de Bogotá. Colombia.*

Honeysett B.

1995

Common structural defects and failures in cob buildings and their diagnosis and repair. In: *Out of earth II. National conference on earth buildings. p. 165-177. Plymouth School of Architecture, Centre for Earthen Architecture. Plymouth. U.K.*

Houben H.

1997

Desert Development Center of the American University in Cairo. Mission in Egypt from 22.02.97 to 01.03.97. Report on the partial collapse of the DDC building Sadat-City. American University, Facilities Department. Cairo. Villefontaine. France.

Houben H., Guillaud H.

1994

Earth construction. A comprehensive guide. IT Publications. London. U.K.

Hoyle A.M.

1998

Chan Chan patrimonio mundial. Memoria estado de la gestión, plan de manejo. Instituto Nacional de Cultura La Libertad, Curso Panamericano de conservación PAT 96. Trujillo. Peru.

Hoyle A.M.

1990

Chan Chan : aportes para la conservación de la arquitectura de tierra. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints*. p. 225-229. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Hoyle A.M., Carcelén S., Saavedra F.

1993

Conservacion del castillo Tomabal, In: *7a conferência internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra. 24 a 29 de Outubro 1993, Silves, Portugal*, p. 480-487. Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Lisbon. Portugal.

Hughes Ph.

1986

The need for old building to "breathe". Society for the Protection of Ancient Buildings. London. U.K.

Hughes R.E. (Ove Arup & Partners)

2000

British Land Pic. Plantation Place. Method Statement for Archaeologically Excavating Documenting and Analysing Buried Soil Walls. London. U.K.

Hughes R.E.

1988

The geotechnical study of soils used as structural materials in historic monuments. In: *Engineering geology of ancient works, monuments and historical sites*. p. 1041- 1048. Balkema. Rotterdam. Netherlands.

Hughes R.E.

1986

"Saving soil structures". Conservation techniques for historic buildings constructed in soil". In: *2ièmes rencontres internationales pour la protection du patrimoine culturel. Avignon, 5, 6 et 7 novembre 1986*. Centre de Congrès du Palais des Papes. Avignon. France.

Hughes R.E.

1986

Le patrimoine culturel et les "risques naturels". In: *Rencontres internationales pour la protection du patrimoine culturel. 2eme colloque*. Congrès du Palais des Papes. Avignon. France.

Hughes R.E.

1985

The repair and maintenance of soil construction buildings. PGC-HS/KU Leuven, CRA/UCL. Leuven. Belgium.

Hughes R.E.

1983

Material and structural behaviour of soil constructed walls. In: *Monumentum N° 3. Techniques and materials*. London. U.K.

Jeannet J., Pollet G., Scarato P.

1986

Le pisé. Patrimoine, restauration, technique d'avenir. Editions CREER. Nonette. France.

Jerome P.S.

1991

Analysis and conservation of mudbrick construction in Bronze Age Crete. Graduate School of Architecture, Planning and Preservation. Bogota. Colombia.

Joffroy Th.

1992

Expertise technique et financière du mur d'enceinte de la résidence consulaire de Marrakech. Rapport de mission à Marrakech, Maroc. 21/04/92 - 27/04/92. MAE (Ministère des Affaires Etrangères), Direction du personnel et de l'administration générale, Service des immeubles et des affaires générales. Paris. France.

Joffroy Th.

1996

Mission to the Gambia, 6-16 may 1996. UNESCO, World Heritage Centre. Paris. France.

Joffroy Th.

1997

In situ training programme Ashanti traditional buildings, Ghana. Report of mission, June 1997. UNESCO, World Heritage Centre. Paris. France.

Joffroy Th., Moriset S.

1996

Guide d'entretien du musée d'Abomey (palais de Ghézo et de Glélé). PREMA - BENIN - II. CRATerre-EAG ; ICCROM. Grenoble / Rome. Italia.

Joffroy Th., Moriset S.

1996

Palais royaux d'Abomey. 1. Circonstances et processus de dégradation. (PREMA - BENIN - II). CRATerre-EAG ; UNESCO, Centre du Patrimoine Mondial ; ICCROM. Grenoble / Paris / Rome. Italia.

Joffroy Th., Moriset S.

1996

Chantiers pilotes de formation à la conservation des mosquées de Tombouctou. Rapport de mission réalisée à Tombouctou, Mali du 22 novembre au 20 décembre 1996. UNESCO, Centre du Patrimoine Mondial ; CRATerre-EAG ; ICCROM. Paris / Grenoble / Rome. Italia.

Joffroy Th., Odul P.

1989

Expertise de la maison en pisé de Mme Rajon à Coublevie. In: *Rapport expertise*. CRATerre-EAG. Grenoble. France.

Joffroy Th. , Savage D., Kwami M., Moriset S.

1997

Conservation of the "Our Lady of Seven Sorrows cathedral", Navrongo, Ghana. The Getty Grant Project ; GAIA Project ; Ghana Museums and Monuments Board. Los Angeles / Grenoble / Accra. U.S.A. & France.

Keefe L.

1993

The cob building of Devon 2. Repair and maintenance. Devon Historic Buildings trust. Devon. U.K.

Koob S.P., Rogers M.H., Sams G.K.

1990

Preserving the eighth Century B.C. mud brick architecture at Gordion, Turkey: approaches to conservation. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints*. p. 289-294. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Leroy Tolles E., Webster F.A., Crosby A., Kimbro E.E.

1996

Survey of damage to historic adobe buildings after the January 1994 Northridge earthquake. GCI scientific program report 1996. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Leroy Tolles E., Webster F.A., Thiel C.C., Kimbro E.E., Ginell W.S.

1991

A framework for understanding the seismic performance of adobe. In: *Conference on seismic retrofit of historic buildings, San Francisco, November 18-19 1991*. National Park Service. San Francisco. U.S.A.

Li Zuixiong

1990

Consolidation of a neolithic earthen site with potassium silicate. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints*. p. 295-301. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Margueron J.C.

1993

Premiers regards sur les solutions techniques mises en oeuvre à Mari (Syrie), vers 2500-2000 av. J.-C., pour la conservation e l'architecture de terre. In: *7a conferência internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra. 24 a 29 de Outubro 1993, Silves, Portugal*, p. 299-303. Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Lisbon. Portugal.

Mari C., Capriani U., Finotelli F.

1998

Progetto di restauro e valorizzazione dell'antica Ebla. In: *Restauro e valorizzazione turistica*. Università degli Studi di Roma "La Sapienza". Rome. Italia.

Matero F.G.

1995

A programme for the conservation of architectural plasters in earthen ruins in the American Southwest, Fort Union National Monument, New Mexico, USA. In: *Conservation and management of archaeological sites*. vol. 1. n° 1. p. 5-24. James & James. London. U.K.

Matero F. G.

1997

Managing change. Conservation of surface finished at Mesa verde's cliff dwellings. In: *CRM*. vol. 20. n° 10. p. 39-42. US Department of the Interior, National Park Service, Cultural Resources. Washington. U.K.

Mesbah A., Olivier M.

1990

Essais simplifiés pour l'identification des sols. In: *1er séminaire international sur l'ingénierie des constructions en terre*, 30-31 Mai, 1er Juin 1990, Marrakech. LPEE. Casablanca. Morocco.

Metzger T.R., Nordby L., Trott J.

1988

Pueblo Grande preservation plan. Pueblo Grande Museum, Archaeology Division. Phoenix. U.S.A.

Middleton G.F., Schneider L.M.

1987

Earth-wall construction. Bulletin n° 5. Fourth edition. National Building Technology Centre. Chatswood. Sydney. Australia.

Morales Gamarra R.

1994

La conservación de relieves de barro policromos en la costa norte del Perú. In: *Moche. Propuestas y perspectivas. Actas del primer coloquio sobre la cultura Moche, Trujillo, 12 al 16 de abril de 1993*. p. 477-492. Universidad Nacional de la Libertad, Instituto Francés de Estudios Andinos, Asociación Peruana para el Fomento de las Ciencias Sociales. Trujillo. Peru.

Moraru D.S., Dima L., Sandru L.

1993

La consolidation des constructions historiques et/ou archéologiques en terre (argile) par injection électrocynétique avec une solution de chaux-bentonite-urée. In: *7a conferência internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra*. 24 a 29 de Outubro 1993, Silves, Portugal, p. 426-428. Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Lisbon. Portugal.

Nardi R.

1988

Conservation of medieval structures of mudbrick and of fired brick laid in clay..
In: *5th international meeting of experts on the conservation of earthen architecture*. p. 71-80. CRATerre-EAG. Grenoble. France.

Naval Mas A.

1990

Restauración y mantenimiento de las casas de Labranza del somontano en el alto Aragón. Diputación General de Aragón, Departamento de Ordenación del Territorio. Saragossa. Spain.

Odul P.

1990

Etude de pathologie réalisée à la demande de Fernand Fédèle. Rapport d'expertise. EAG, CRATerre. Grenoble . France.

Odul P.

1990

Pathologie humide de constructions en terre : méthodologie de diagnostic. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints*. p. 404-413. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Ottazi G., Villagarcia G.

1995

Ensayos de simulacion sismica en viviendas de adobe. In: *Habiterra. Exposición iberoamericana de construcciones de tierra*, p. 220-221. ESCALA. Santafé de Bogotá. Colombia.

Pearson G.

1995

Repair techniques in the Test valley : dealing with structural cracks. In: *Out of earth II. National conference on earth buildings*. p. 182-186. Plymouth School of Architecture, Centre for Earthen Architecture. Plymouth. U.K.

Pearson G.T.

1992

Conservation of clay & chalk buildings. Donhead. London. U.K.

Peroni S., Tersigni C., Torroca G., et al.

1994

Lime based mortars for the repair of ancient masonry and possible substitutes. In: *International course on the preservation of the earthen architectural heritage. GAIA project, PAT 94, chap. Mortars, plasters and renders*. CRATerre, ICCROM . Grenoble / Rome. France & Italia.

Pinilla Velasco F.

1991

Métodos de eliminacion de humedades por capilaridad. In: *Jornadas sobre restauracion y conversación de monumentos. Madrid, 24 y 25 de abril de 1989*. p. 199-203. Instituto de conservación y restauración de bienes culturales. Madrid. Spain.

Piqué F., Rainer L.

1996

Conservation of the bas-reliefs from the salle des bijoux at the musée historique, palais royaux d'Abomey. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Piqué F., Rainer L.

1997

Benin : the royal palaces of Abomey. In: *US/ICOMOS. n° 5. p. 3, 10.* US/ICOMOS. Washington. U.S.A.

Pujal A.J.

1993

Restoration techniques for earthen buildings of historical value. Actual cases. In: *7a conferência internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra. 24 a 29 de Outubro 1993, Silves, Portugal. p. 244-249.* Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Lisbon. Portugal.

Ramirez G.B.H.

1992

La pathologie des anciennes constructions en terre. Diagnostic. Méthode d'observation. EAG. Grenoble. France.

Roselund N.

1993

Repair of cracked adobe walls by injection of modified mud. In: *7a conferência internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra. 24 a 29 de Outubro 1993, Silves, Portugal, p. 336-341.* Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Lisbon. Portugal.

San Bartolomé A.

1995

Ensayo sísmico de un modulo de tapial reforzado. In: *Habíterra. Exposición iberoamericana de construcciones de tierra, p. 222-223.* ESCALA. Santafé de Bogotá. Colombia.

Saremkalali H., Witmann F.H.

1987

Protection des maçonneries en terre crue. In: *Le patrimoine Européen construit en terre et sa réhabilitation. Colloque international 18-19-20 mars 87 à l'ENTPE. p. 175-193.* Formequip. Lyon. France.

Saunders J.

1997

Conserving historic earthbuildings. In: *EBANZ newsletter. May 1997. p. 25-28.* EBANZ. Whangarei. New Zeland.

Scarato P.

1987

Pathologie, restauration, réhabilitation terre. Auvergne Rhône Alpes, une association spécialisée sur le terrain. In: *Le patrimoine Européen construit en terre et sa réhabilitation. Colloque international 18-19-20 mars 87 à l'ENTPE. p. 139-150.* Formequip. Lyon. France.

Selwitz C.

1995

Saving the Fort Selden ruins. The use of a composite blend of chemicals to stabilize fragile historic adobe. In: *Conservation and management of archaeological sites*. vol. 1. p. 69-71. James & James. London. U.K.

Selwitz C.

1994

Continuing research on the development of a composite treatment for preserving historic adobe. In: *US/ICOMOS. Committee on earthen architecture*. n° 10. p. 10-11. US/ICOMOS. Washington. U.S.A.

Selwitz C., Caperton Th.J.

1995

Chemical stabilization of adobe in the restoration of the Montaña store. In: *APT bulletin*. p. 37-41. APT. Fredericksburg. U.S.A.

Selwitz C., Coffman R., Agnew N.

1990

The Getty adobe research project at Fort Selden. III. An evaluation of the application of chemical consolidants to test walls. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints*. p. 255-260. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Semple Kerr, J.

1996 (4th enlarged edition)

The Conservation Plan. The National Trust of Australia. Sydney. Australia.

Silver C.S.

1990

Aztec ruins national monument : report on the conservation treatment of plasters in rooms 117 and 156. Conservation of Cultural Treatment. New York. U.S.A.

Silver C.S.

1990

Analyses and conservation of Pueblo architectural finishes in the American Southwest. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints*. p. 176-181. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Silver C.S.

1992

Conservation treatment of prehistoric murals on mud renderings at Aztec ruins national monument. In: *US/ICOMOS Newsletter*. n° 7. p. 6. US/ICOMOS. Washington. U.S.A.

Skibinski S.

1991

Problemas de conservación de monumentos arqueológicos de piedra en el Perú y Ecuador. UNESCO, Wydawnictwa UMK. Paris / Torun. France & Poland.



Sramek J., Losos L.

1990

Outline of mud brick structures conservation at Abusir, Egypt. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints*. p. 449-454. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Stanley Price N., Talley K.Jr., Melucco Vaccaro A.

1996

Historical and philosophical issues in the conservation of cultural heritage. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Stevens A.

1986

Structures nouvelles de protection des sites archéologiques du tiers-monde. In: *Preventive measures during excavation and site protection. Conference. Mesures préventives en cours de fouilles et protection du site. Ghent, 6-8 novembre 1985*. p. 225-244. ICCROM. Rome. Italia.

Sullivan, S.

1996

Heritage Management Training Project. Course Manual. Edited for publication by Leora Kirwan and Peter Judge. Commonwealth of Australia. Australia.

Sullivan, S.

1997

A Planning Model for the Management of Archaeological Sites, in The Conservation of Archaeological sites in the Mediterranean Region. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Taylor M.R.

1987

An overview and assessment of cappings used for protecting exposed adobe walls. Architectural Conservation Course. Rome. Italia.

Taylor M.R.

1987

Fort Selden test wall project. Second annual status report. Museum of New Mexico. New Mexico. U.S.A.

Taylor M.R.

1990

An evaluation of the New Mexico State monuments adobe test walls at Fort Selden. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints*, p. 383-389. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Teutonico J.M.

1991

Memorandum. Traditional claywork (cob and daub) seminar. In: *Traditional claywork (cob and daub) seminar to be held at Bowhill, Exeter, 6 february 1991*. English Heritage. London. U.K.

Teutonico J.M.

1988

A laboratory manual for Architectural Conservation.. ICCROM. Rome. Italia.

Teutonico J.M., McCaig I., Burns C., Ashurst J.

1994

The Smeaton Project : factors affecting the properties of lime-based mortars. English Heritage. London. U.K.

Tharan M.

1987

Pathologie de l'adobe. In: *Le patrimoine Européen construit en terre et sa réhabilitation. Colloque international 18-19-20 mars 87 à l'ENTPE.* p. 507-516. Formequip. Lyon. France.

Torraca G.

1988

Porous building materials. Materials science for architectural conservation. ICCROM. Rome. Italia.

Torrealva Davila D.

1995

Ensayos sismicos de modulo de Quincha en dos pisos. In: *Habiterrra. Exposición iberoamericana de construcciones de tierra,* p. 224-225. ESCALA. Santafé de Bogotá. Colombia.

Uviña F.C. et al.

1998

Adobe architecture conservation handbook. Cornerstones Community Partnerships. Santa Fe. U.S.A.

Van Balen K.

1990

Méthodologie de la conservation et de la restauration des monuments en terre. In: *6th international conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 preprints.* p. 182-187. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. U.S.A.

Vargas J., Bariola J., Blondet M., Metha P.K.

1985

Seismic strenght of adobe masonry. In: *Conference papers of the international colloquium on "Earth construction technologies appropriate to developing countries". Proceedings of the international colloquium. Brussels, 10-12 December 1984.* p. 392-408. PGC-HS/KU Leuven, CRA/UCL. Leuven. Belgium.

Vargas Neumann J.

1993

Earthquake resistant rammed-earth (tapial) buildings. In: *7a conferência internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra. 24 a 29 de Outubro 1993, Silves, Portugal,* p. 503-508. Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Lisbon. Portugal.

Vargas Neumann J.

1993

Seismic retrofitting of historic adobes. In: *7a conferência internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra. 24 a 29 de Outubro 1993, Silves, Portugal,* p. 533-538. Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Lisbon. Portugal.

Watanabe K., Bossart, P.

1992

Complementary methods for measuring water inflow into the ventilation drift. In: *Technical report 91 - 34. Grimsel test site. Overview of Nagra field and modeling activities in the ventilation drift (1988 - 1990)*. Nagra. Wettingen. Japan.

Watanabe K., Tsutsui Y.

1994

A new equipment used for measuring evaporatin in a field. Un nouvel équipement utilisé dans la mesure de l'évaporation sur le terrain. In: *7th international IAEG Congress*. p. 309. Balkema. Rotterdam. Nederland & Japan.

Webster F.

1994

Research and code improvement. Some thoughts on "Adobe codes". In: *Adobe codes. For the owner-coordinator or professional. A guide to the adobe codes of Arizona, New Mexico and Texas - with California details*. 3rd edition. p. 53-58. Southwest Solaradobe School. Bosque. U.S.A.

Webster, F., Guinn J.D.

1993

Evolution of sismic retrofit techniques for historic and older adobes in California. In: *7a conferência internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra*. 24 a 29 de Outubro 1993, Silves, Portugal, p. 521-525. Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Lisbon. Portugal.